



Reconception de l'outil de production dans un contexte de minimisation de la consommation énergétique

Thi Ai Lanh Nguyen

► To cite this version:

Thi Ai Lanh Nguyen. Reconception de l'outil de production dans un contexte de minimisation de la consommation énergétique. Autre. Université Grenoble Alpes, 2016. Français. NNT : 2016GREAI009 . tel-01315171

HAL Id: tel-01315171

<https://theses.hal.science/tel-01315171>

Submitted on 12 May 2016

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THÈSE

Pour obtenir le grade de

**DOCTEUR DE LA COMMUNAUTÉ UNIVERSITÉ
GRENOBLE ALPES**

Spécialité : **Génie Industriel**

Arrêté ministériel : 7 août 2006

Présentée par

Thi Ai Lanh NGUYEN

Thèse dirigée par **Henri PARIS** et
codirigée par **Matthieu MUSEAU**

préparée au sein du **Laboratoire G-SCOP**
dans **l'École Doctorale I-MEP2**

Reconception de l'outil de production dans un contexte de minimisation de la consommation énergétique

Thèse soutenue publiquement le **04 Avril 2016**,
devant le jury composé de :

M. Pascal MOGNOL

Professeur des Universités, École Normale Supérieure de Rennes,
Président

Mme. Hélène CHANAL

Maitre de Conférences HDR, Institut Pascal, Sigma Clermont,
Rapporteur

M. Bertrand ROSE

Maitre de Conférences HDR, Université de Strasbourg, Rapporteur

Mme. Peggy ZWOLINSKI

Professeur des Universités, Université Grenoble Alpes, Membre

M. Henri PARIS

Professeur des Universités, Université Grenoble Alpes, Membre

M. Matthieu MUSEAU

Maitre de Conférences, Université Grenoble Alpes, Membre



Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier Mme. Hélène Chanal et M. Bertrand Rose pour avoir accepté d'être les rapporteurs de mes travaux de thèse.

Je remercie M. Pascal Mognol d'avoir présidé mon jury. Je remercie également Mme. Peggy Zwolinski pour sa participation au jury.

Je remercie sincèrement du fond de mon cœur mes deux encadrants, M. Henri Paris et M. Matthieu Museau, tout d'abord pour avoir accepté de m'encadrer et de diriger ces travaux de recherche et ensuite pour leurs conseils précieux, leur disponibilité et leur réactivité. J'ai eu l'honneur et la chance d'avoir travaillé avec eux. Tous les mots ne suffisent pas à exprimer ma reconnaissance envers eux.

Je souhaite également remercier M. Frédéric Vignat et M. Guy Prudhomme pour l'aide qu'ils m'ont apportée. Un grand merci à tous les membres du laboratoire G-SCOP pour l'ambiance chaleureuse et tous les agréables moments passés ensemble.

Je remercie chaleureusement à mes amis Vietnamiens au laboratoire G-SCOP et à l'extérieur pour les moments conviviaux passés ensemble.

Je réserve les derniers mots pour ma famille...

Remerciements

Ba mẹ ạ, như vậy là con cũng đã hoàn thành luận án tiến sĩ sau gần 6 năm xa nhà. Con biết không lời cảm ơn nào có thể đáp lại tình yêu thương mà ba mẹ dành cho con, nhưng con vẫn muốn cảm ơn ba mẹ đã luôn ủng hộ, động viên, tiếp sức cho con trên con đường học vấn. Con mong ba mẹ luôn khỏe mạnh.

Chồng à, em cảm ơn anh đã luôn bên cạnh, chia sẻ cùng em những vui buồn trong công việc và trong cuộc sống. Cảm ơn anh đã tiếp thêm cho em sức mạnh để hoàn thành luận án. Anh hãy luôn là bờ vai vững chắc nhất cho mẹ con em nghe chồng. Yêu chồng nhiều.

Chàng trai yêu quý của mẹ, mẹ cảm ơn con đã đến bên ba mẹ. Con là món quà vô giá mà trời đã ban tặng cho ba mẹ, con trai ạ. Mẹ yêu con nhiều và mong con luôn khỏe mạnh, chàng trai bé nhỏ của mẹ.

Table des matières

<i>Introduction générale.....</i>	4
<i>CHAPITRE I : Contexte générale de l'étude.....</i>	6
I. Enjeux énergétiques :.....	8
I.1. L'industrie, un des grands consommateurs énergétiques :.....	9
I.2. L'important de l'efficacité énergétique dans l'industrie :.....	10
II. Enjeux législatifs :.....	11
III. L'efficacité énergétique du moyen de production.....	12
IV. Synthèse :	13
<i>CHAPITRE II : Etat de l'art</i>	14
<i>Résumé du chapitre.....</i>	15
I. La consommation énergétique d'un moyen de production	16
I.1. Niveau d'analyse de la consommation énergétique	16
I.2. Le périmètre d'analyse du système de production	17
I.3. L'état de fonctionnement du système de production :	17
I.4. Décomposition de la consommation énergétique :	18
I.5. La consommation énergétique d'un moyen de production :	23
II. L'efficacité énergétique :	27
II.1. Définition :	27
II.2. Les actions permettant d'améliorer l'efficacité énergétique d'un moyen de production :.....	28
III. Conception pour l'efficacité énergétique :	34
III.1. Conception pour X	34
III.2. La conception pour l'efficacité énergétique :.....	35
III.3. Les limites et différentes approches issues de la littérature	39
IV. Conclusion :	40

CHAPITRE III : Analyse du moyen de production dans la (re)conception pour l'efficacité énergétique	42
I. La conception pour l'efficacité énergétique :	44
II. L'outil d'évaluation de l'efficacité énergétique	46
II.1. L'énergie participant à ajouter de la valeur au produit.....	46
II.2. Modèle de calcul de l'énergie valorisée:	47
II.3. Répartition de l'énergie valorisée:	49
II.4. Indicateur d'efficacité énergétique :	52
II.5. Le gain énergétique potentiel :	54
III. Analyse du moyen de production :	55
III.1. Critère de décomposition :	55
III.2. Méthode d'analyse du moyen de production :	58
IV. Exemple :	59
IV.1. Description du centre d'usinage :	59
IV.2. Opération de coupe :	60
IV.3. Analyse énergétique de la machine :	60
V. Conclusion :	69
CHAPITRE IV : Méthode de proposition des scénarios de reconception	70
I. Analyse fonctionnelle :	72
I.1. Fonction	72
I.2. Solution technique	72
I.3. Association Fonction-Technologie :	74
II. Matrice d'interaction entre les organes:	75
III. Méthode de proposition des scénarios de reconception :	80
III.1. Les grandes pistes de reconception :	80
III.2. Méthode de proposition des scénarios de reconception :	81
IV. Exemple :	86
IV.1. Analyse fonctionnelle :	86
IV.2. Matrice d'interaction énergétique entre les organes :	88

IV.3. Proposition des scénarios des scénarios de reconception :.....	91
V. Conclusion :.....	93
I. Conclusion	94
II. Perspectives.....	95
Bibliographie	96

Introduction générale

L'industrie française est un secteur particulièrement lié aux problématiques de réduction des consommations énergétiques car elle représente 21% de la consommation nationale et est responsable de près de 20% des émissions de gaz à effet de serre. L'amélioration de l'efficacité énergétique dans l'industrie est donc un enjeu majeur pour répondre aux objectifs environnementaux et économiques.

Face aux problématiques énergétiques actuellement posées et aux enjeux législatifs, il est important de prendre en compte une contrainte supplémentaire : l'efficacité énergétique dans la reconception du moyen de production. Dans le cadre de notre étude, nous nous concentrons particulièrement sur la méthodologie de reconception afin d'améliorer l'efficacité énergétique de l'outil de production en gardant le procédé de fabrication inchangé.

Contribution de la thèse

Cette thèse contribue à la résolution des problématiques liées à la réduction de la consommation énergétique du moyen de production. Nous proposons une méthodologie de reconception permettant d'améliorer l'efficacité énergétique. Cette méthodologie de reconception s'articule autour des étapes suivantes :

- ✚ **Analyse** : Mise en œuvre d'une méthode d'analyse du moyen de production. L'idée est de déterminer une cartographie de la consommation énergétique du moyen de production avec une bonne granulométrie de décomposition. L'évaluation de l'efficacité énergétique nécessite un état des lieux des consommations énergétiques du moyen de production. Elle permet d'identifier les *hots spots énergétiques*. Pour ce faire, un indicateur d'efficacité énergétique est proposé afin d'évaluer l'efficacité énergétique du moyen de production et de ses organes.
- ✚ **Proposition des scénarios de reconception** : Mise en place d'une méthode visant à proposer des modifications de la conception actuelle de manière à améliorer l'efficacité énergétique. A l'issue des informations sortant de l'analyse de l'efficacité énergétique du moyen de production et de ses organes, les scénarios de reconception sont proposés en s'appuyant sur les pistes de reconception suivantes :

- *Remplacement par une technologie plus efficace*
- *Amélioration du rendement de la technologie*
- *Utilisation de l'énergie « au juste besoin »*
- *Récupération de l'énergie*

Organisation du manuscrit

Ce manuscrit est organisé en quatre chapitres. Le premier présente le contexte général dans lequel s'inscrit notre travail de thèse. Il s'agit de fournir une vision globale des enjeux énergétiques, des enjeux législatifs et des enjeux industriels sur les problématiques liées à la réduction de la consommation énergétique d'un moyen de production.

Le deuxième chapitre présente un état de l'art concernant:

- la consommation énergétique du moyen de production : le périmètre d'analyse du système de production, la décomposition de la consommation énergétique et les modèles de consommation énergétique existants.
- les actions et approches permettant d'améliorer l'efficacité énergétique du moyen de production proposées dans la littérature.

Le troisième chapitre est consacré à la présentation d'une méthode d'analyse du moyen de production. Nous débutons ce chapitre par la présentation générale de la conception pour l'efficacité énergétique. Nous présentons par la suite un indicateur permettant d'évaluer l'efficacité énergétique du moyen de production et de ses différents organes. A la fin de ce chapitre, une méthode d'analyse permettant d'avoir une cartographie de la consommation énergétique du moyen de production est présentée.

Le quatrième chapitre concerne la méthode de proposition des scénarios de reconception. Dans ce chapitre, une analyse fonctionnelle et un modèle d'interaction énergétique entre les organes du moyen de production sont proposés. En se basant sur les grandes pistes de reconception, les scénarios de reconception du moyen de production sont proposés.

Le manuscrit se termine par une conclusion générale donnant des perspectives à ces travaux de thèse.

CHAPITRE I : Contexte générale de l'étude

SOMMAIRE

<i>CHAPITRE I : Contexte générale de l'étude</i>	6
I. Enjeux énergétique :.....	8
I.1. L'industrie-un des grands consommateurs énergétiques :	9
I.2. L'important de l'efficacité énergétique dans l'industrie :	10
II. Enjeux législatifs :.....	11
III. L'efficacité énergétique du moyen de production	12
IV. Synthèse :	13

Résumé du chapitre

Aujourd'hui, la consommation énergétique de l'industrie représente une part importante de l'énergie consommée en France (21%). En conséquence, la problématique de l'énergie dans l'industrie suscite actuellement notre intérêt. Dans ce chapitre, nous introduisons le contexte général de notre travail de thèse. Il s'agit de fournir une vision globale des enjeux énergétiques, enjeux législatifs et enjeux industriels sur les problématiques liées à la réduction de la consommation énergétique d'un moyen de production.

I. Enjeux énergétiques :

“Energy is fundamental to the quality of our lives. Nowadays, we are totally dependent on an abundant and uninterrupted supply of energy for living and working. It is a key ingredient in all sectors of modern economies.” – [European Commission, 2009]

Aujourd'hui, avec l'augmentation des prix de l'énergie, le déficit des ressources énergétiques, la croissante préoccupation sur les émissions de carbone et en raison du réchauffement global par les émissions de CO₂, nous prenons conscience de la nécessité de réduire la consommation de l'énergie. Les sources d'énergie peuvent être classées en deux catégories: non renouvelables et renouvelables. Selon l'Agence internationale de l'énergie [AIE, 2009], environ 85% de l'énergie produite et consommée actuellement est dérivée de la source non renouvelable, le reste provenant de sources renouvelables et nucléaires. La transformation de l'énergie primaire à partir de ressources non renouvelables comme le charbon, le pétrole et le gaz naturel est intrinsèquement liée aux émissions de CO₂. Le CO₂ émis par la conversion de l'énergie représente la source la plus abondante de gaz à effet de serre affectant le changement climatique. Au niveau mondial, les émissions de CO₂ dues à l'énergie sont estimées par [AIE, 2014], à 31734 Mt en progression de 51% depuis l'année 1990. Elles sont issues de l'industrie de l'énergie (47%), des transports (23%), de l'industrie (20%), des ménages (6%), des services et de l'agriculture (4%).

La demande énergétique mondiale est tendanciellement en force croissance sous l'effet de l'augmentation de la population dans les pays en développement. Selon [AIE, 2008], la demande énergétique sera de 40% plus élevée en 2030 par rapport au niveau de 2008, en raison des augmentations significatives des demandes de la Chine et de l'Inde [Figure I.1].

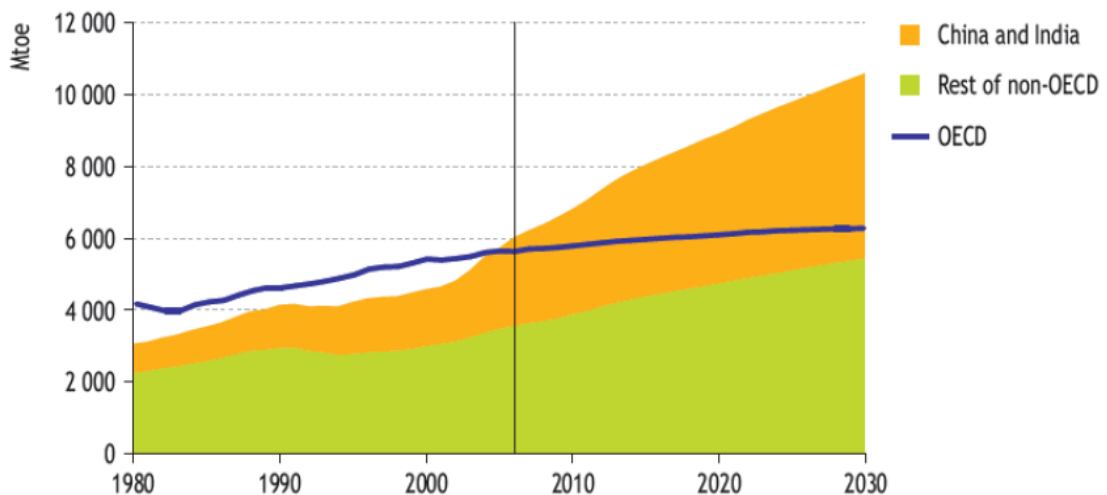


Figure I.1 : La demande d'énergie mondiale par région [AIE, 2008]

Comme dans l'ensemble des pays développés, la consommation d'énergie a crû de manière quasi ininterrompue en France, mais elle s'est stabilisée depuis 2000. En France, la consommation énergétique totale (corrigée des variations climatiques) s'est élevée à 154.4 Mtep en 2012. Elle a baissé de 0.5% par rapport à l'année 2011 [MEDDE/SOes, 2013]

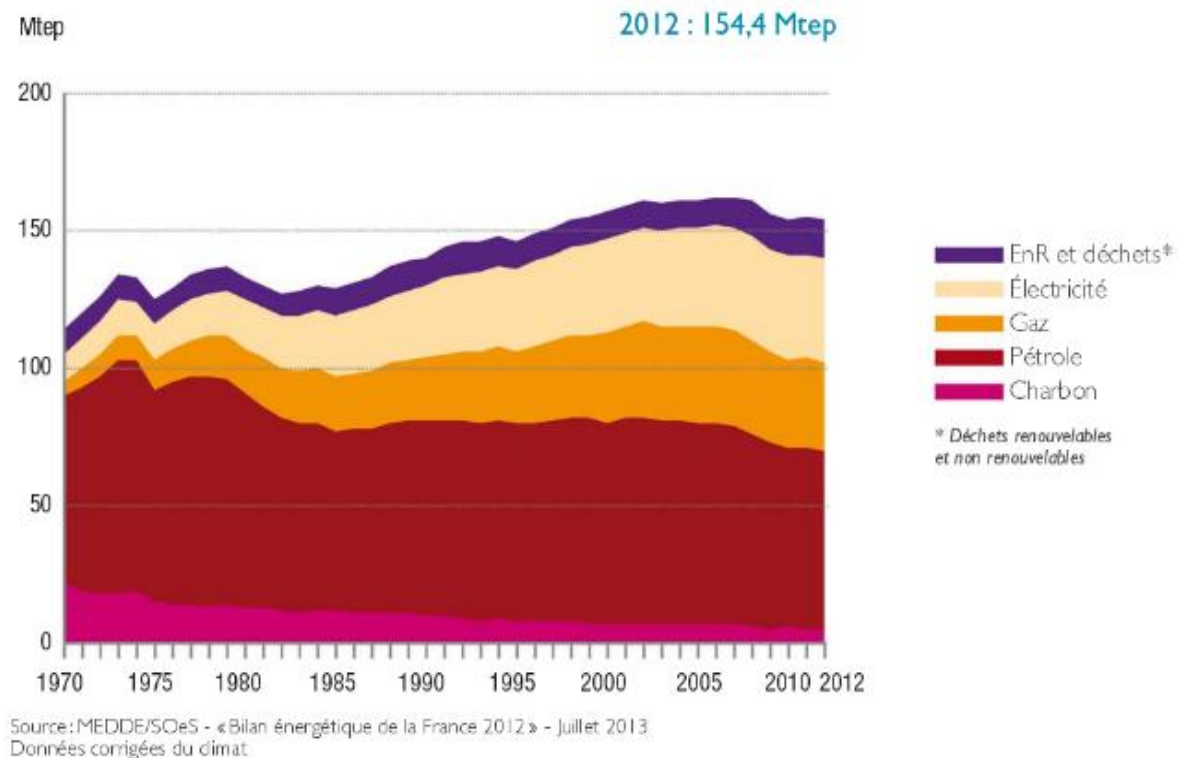


Figure I.2 : La consommation d'énergie totale en France en 2012

I.1. L'industrie, un des grands consommateurs énergétiques :

Les sites industriels font partie des secteurs énergivores. Au niveau mondial, le secteur de l'industrie représente presque un tiers de la consommation d'énergie (28.3%), voir Figure I.3, et presque 40% des émissions de CO₂ [IEA, 2014]. En particulier, les pays émergents ont généralement une plus grande proportion d'industries à forte consommation énergétique.

	Part de la consommation finale en 2012	Consommation mondiale en 2012 en millions de tonnes d'équivalent pétrole (Mtep)
Consommation finale	100%	8 979
Industrie	28,3%	2 541
Transports	27,9%	2 507
Résidentiel, agriculture et autres secteurs	34,8%	3 122
Usage hors énergie	9,0%	809

Consommation finale d'énergie par secteur dans le monde en 2012 (d'après données du Key World Energy Statistics 2014)

Figure I.3 : La consommation énergétique mondiale par secteur en 2012 [IEA, 2014]

En France, le secteur industriel est aujourd'hui le troisième secteur le plus consommateur d'énergie, derrière le secteur résidentiel-tertiaire et les transports. Il représente plus de 21% de l'énergie consommée (Figure I. 4) [MEDDE/SOes, 2013]. Cette consommation énergétique est responsable de près de 20% des émissions de gaz à effet de serre.

Répartition de la consommation finale d'énergie par secteur, en France en 2012

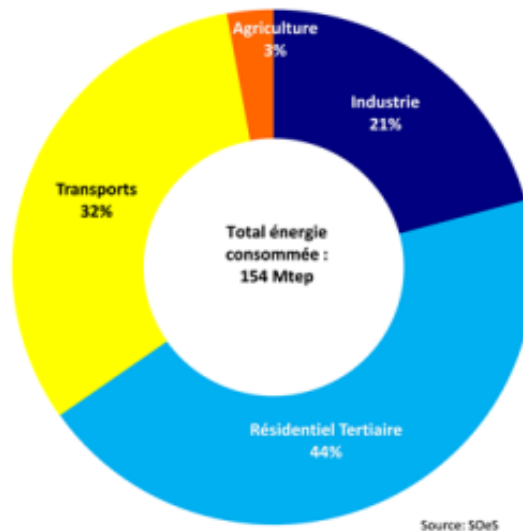


Figure I. 4. La consommation énergétique en France par secteur en 2012

I.2. L'important de l'efficacité énergétique dans l'industrie :

La consommation énergétique des procédés industriels représente une part significative de la consommation énergétique française: elle est estimée à 28 Mtep/an.

Actuellement, le secteur industriel réalise des efforts significatifs de réduction de la consommation d'énergie grâce aux progrès techniques et aux innovations technologiques. A travers les scénarios énergétiques proposés pour 2030, l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME) montre qu'en 12-20 ans, l'industrie pourrait gagner 20% d'efficacité énergétique grâce à la mise en œuvre de solutions organisationnelles et également grâce à des solutions innovantes [ADEME, 2013].

La consommation d'énergie dans l'industrie est un enjeu écologique majeur, mais également un enjeu économique car elle représente une part significative des coûts de production. L'amélioration de l'efficacité énergétique permet aux industries de :

- **Répondre aux enjeux de compétitivité :**

La compétitivité d'une industrie repose entre autre sur la maîtrise de sa facture énergétique. Dans un contexte de crise industrielle et de concurrence de plus en plus acerbé, la maîtrise de la consommation d'énergie et l'amélioration de l'efficacité énergétique représentent donc des enjeux majeurs de compétitivité pour l'industrie. L'amélioration de l'efficacité énergétique permet à l'industrie de réduire ses coûts de production et donc d'augmenter sa marge de profits.

- **Répondre aux enjeux environnementaux :**

L'amélioration de l'efficacité énergétique dans l'industrie permet de réaliser des économies globales de CO₂. Elle contribue donc à la lutte contre le réchauffement climatique.

II. Enjeux législatifs :

En ce qui concerne la menace du changement environnemental et la rareté des sources d'énergie non renouvelables, l'amélioration de l'efficacité énergétique dans l'industrie prends son importance. Plus de 75 pays ont annoncé et commencé à adopter des règlements et normes liées à la consommation d'énergie.

- **Règlementation « Energy 2020 » :**

L'Union européenne a mis en œuvre la réglementation « Energy 2020 » qui détermine une cible de réduction de 20% de la consommation d'énergie primaire, ainsi qu'une réduction des émissions d'au moins 20% par rapport à l'année 1990.

- **Directive 2012/27/EU relative à l'efficacité énergétique :**

Cette directive établit « un cadre commun de mesures pour la promotion de l'efficacité énergétique dans l'Union européenne en vue d'assurer la réalisation du grand objectif

d'accroître de 20% l'efficacité énergétique d'ici à 2020 et de préparer la voie pour de nouvelles améliorations de l'efficacité énergétique au-delà de cette date »

- **Directive 2009/125/CE :**

Cette directive établit un cadre pour fixer des exigences en matière d'éco-conception applicables aux produits liés à l'énergie. Un produit lié à l'énergie est « tout produit ayant un impact sur la consommation énergétique durant son utilisation, y compris les pièces prévues pour y être intégré et qui sont mises sur le marché sous forme de pièces détachées destinées aux utilisateurs finaux et dont la performance environnementale peut-être évaluée de manière indépendante », par exemple : les systèmes de climatisation, de ventilation, les machines-outils...

La France s'est également engagée à réduire ses émissions de gaz à effet de serre et à améliorer l'efficacité énergétique dans les différents secteurs de la consommation énergétique. En effet, suite au sommet de la Terre de Rio en 1992 et le protocole de Kyoto en 1997, la France s'est engagée en 2002 à respecter les directives de l'Union Européenne « Efficacité Énergétique » ayant comme objectif la réduction des émissions de gaz à effet de serre. En 2004, le plan Climat a été lancé. Le plan Climat consiste à fixer des objectifs à court et à moyen terme :

- Diviser par quatre les émissions de gaz à effet de serre en 2050
- Augmenter la production d'énergie renouvelable thermique de 50 % en 2015
- Augmenter la production d'énergie renouvelable électrique de 25 % en 2015

Concernant l'efficacité énergétique, la France a adopté un objectif de réduction de consommation énergétique finale de 2% par an à partir de 2015 et de 2,5 % par an dès 2030.

III. L'efficacité énergétique du moyen de production

La sensibilité énergétique actuelle et la pression législative nous conduisent à réfléchir sur l'efficacité énergétique des sites de production. Envions un tiers de la demande d'énergie mondiale et des émissions de CO₂ sont imputables au secteur de la fabrication [European Commission, 2009]. L'efficacité énergétique est donc une des cibles importantes des sites de production du futur.

L'amélioration de l'efficacité énergétique est source d'intérêts pour les chercheurs. Nous pouvons lister ici différentes pistes d'amélioration de l'efficacité énergétique [Museum et al., 2012]:

- *L'optimisation des paramètres du process*: Dans différentes études [Kara et al., 2011], [Diaz et al., 2011], les auteurs nous montrent que le gain énergétique obtenu reste faible car les paramètres du process sont déjà optimisés pour répondre à différentes contraintes comme la productivité ou la qualité de la surface usinée. Ils nous montrent également que plus la productivité d'un system de production est élevée, plus l'efficacité énergétique est meilleure.
- *L'étude de process alternatifs innovants* : La mise en place de techniques plus innovantes permet actuellement de produire des pièces mécaniques par ajout de matière. Dans le travail de Vayre et al. [Vayre et al., 2012], un état de l'art de la technologie de fabrication additive métallique est présenté et les auteurs montrent qu'il est possible aujourd'hui d'utiliser cette nouvelle technologie pour produire des pièces de bonne qualité. Par contre, la question des impacts environnementaux et de l'efficacité énergétique de cette technologie se pose actuellement.
- Un axe d'amélioration de l'efficacité énergétique qui est peu développé actuellement est *la reconception d'un moyen de production tout en améliorant son efficacité énergétique*. Il peut être réalisé avec ou sans évolution du procédé de fabrication.

Dans cadre de notre travail, nous nous intéressons à la reconception du moyen de production pour améliorer l'efficacité énergétique sans évolution du procédé de fabrication.

IV. Synthèse :

Dans ce chapitre, nous avons placé notre travail dans un contexte global lié à la consommation énergétique dans le secteur industriel et en particulier la consommation énergétique du moyen de production. Les enjeux énergétiques et enjeux législatifs actuellement posés soulèvent la nécessité de prendre en compte l'efficacité énergétique du moyen de production lors de sa conception. L'amélioration de l'efficacité énergétique est un des leviers possibles permettant de répondre aux problématiques de réduction de la consommation énergétique et également de répondre à des objectifs économiques. Dans cadre de notre travail, nous nous intéressons particulièrement à la reconception d'un moyen de production, sans évolution du procédé de fabrication, tout en améliorant l'efficacité énergétique.

CHAPITRE II : Etat de l'art

SOMMAIRE

CHAPITRE II : Etat de l'art	14
I. La consommation énergétique d'un moyen de production	16
I.1. Niveau d'analyse de la consommation énergétique	16
I.2. Le périmètre d'analyse du système de production	17
I.3. L'état de fonctionnement du système de production :	17
I.4. Décomposition de la consommation énergétique :	18
I.5. La consommation énergétique d'un moyen de production :	23
II. L'efficacité énergétique :	27
II.1. Définition :	27
II.2. Les actions possibles pour améliorer l'efficacité énergétique d'un moyen de production :	28
III. Conception pour l'efficacité énergétique :	34
III.1. Conception pour X	34
III.2. Conception pour l'efficacité énergétique :	35
III.3. Les manques et limites dans la proposition des actions possibles existante pour améliorer l'efficacité énergétique d'un moyen de production	39
IV. Conclusion :	40

Résumé du chapitre

Ce chapitre vise à présenter une étude bibliographique sur la consommation d'énergie et l'efficacité énergétique d'un outil de production. Dans un premier temps, la consommation énergétique d'un moyen de production et le choix du contour d'étude sont présentés. L'aspect de l'efficacité énergétique est ensuite présenté avec les approches et les actions existantes permettant de réduire la consommation énergétique d'un outil de production. Nous faisons ensuite un état de l'art des travaux existants dans la conception pour l'efficacité énergétique. Enfin, nous présentons une synthèse de cet état de l'art et positionnons nos travaux de thèse.

I. La consommation énergétique d'un moyen de production

I.1. Niveau d'analyse de la consommation énergétique

La demande énergétique d'un moyen de production dépend des caractéristiques spécifiques du moyen de production, du procédé de fabrication et des propriétés du matériau de la pièce à fabriquer [Wolfram, 1986], [Zein, 2012]. L'analyse des flux d'énergie d'un moyen de production est une étape essentielle pour identifier l'origine de la demande énergétique du moyen de production et de ses différents composants. La consommation énergétique peut être abordée avec différents niveaux d'analyse. Duflou et al. [Duflou et al., 2012] proposent cinq niveaux d'analyse de la consommation énergétique: niveau du process, niveau du système multi-machines, niveau de l'usine, niveau du système multi-usines et niveau de l'entreprise. Une autre décomposition de niveaux d'analyse de la consommation énergétique est également présentée dans le travail de Apostolos et al. [Apostolos et al., 2013], voir Figure II.1. Dans la Figure II.1, le plus bas niveau d'analyse est celui du process et le plus haut niveau d'analyse est celui de l'usine de fabrication.

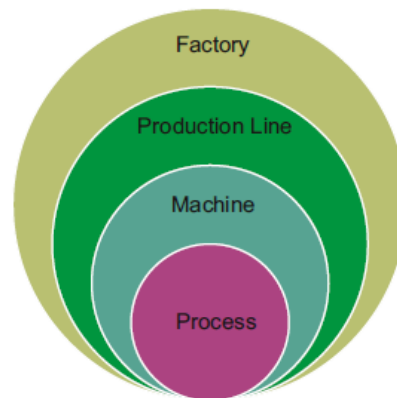


Figure II.1 : Différents niveau d'analyse de la consommation énergétique [Apostolos et al., 2013]

- *Niveau du process de fabrication* : il s'agit de l'étude d'énergie liée aux mécanismes physiques du process de fabrication lui-même. Par exemple, dans le cas d'une machine-outil, la demande d'énergie liée au process de fabrication est la part de l'énergie demandée par l'outil de coupe afin d'enlever de la matière. Dans le cas d'une machine laser, cela correspond à l'énergie requise du faisceau laser pour fabriquer la pièce.
- *Niveau de la machine* : l'énergie analysée est celle consommée par le process de fabrication et celle consommée par les composants du moyen de production afin d'assurer un bon fonctionnement de la machine. Par exemple dans le cas d'une

machine-outil, elle est identique à l'énergie totale consommée par la machine-outil. Dans certains cas, il faut prendre en compte également la part de l'énergie consommée par les équipements périphériques partagés entre les différentes machines outils.

- *Niveau de la ligne de production* : il s'agit de l'étude de l'énergie liée à un ensemble de moyens de production et aux équipements périphériques afin d'assurer un bon fonctionnement d'une ligne de production.
- *Niveau de l'usine* : il s'agit de l'étude d'énergie consommée liée à un ensemble de lignes de production. A ce niveau d'analyse, l'étude de l'énergie se concentre sur l'énergie consommée par les infrastructures et les services permettant de maintenir les conditions de production demandées, par exemple : ventilation, éclairage...

Dans nos travaux de thèse, nous nous intéressons à l'analyse de la consommation énergétique au niveau de la machine afin d'obtenir une vision globale sur la consommation énergétique des différents organes de la machine.

I.2. Le périmètre d'analyse du système de production

Le périmètre d'analyse du système de production correspond à la délimitation précise du système de production à analyser. Cela permet de définir les flux d'énergie, de matériaux et de substances traversant le système de production. Le périmètre d'analyse du système de production peut être réduit ou élargi selon le besoin de recherche.

La définition du périmètre d'analyse du système joue un rôle important vis à vis des résultats d'analyse obtenus. En effet, si le périmètre d'analyse n'est pas suffisamment spécifié, la comparaison des différents systèmes de production peut s'avérer difficile. Il est donc important de déterminer le contour du système de production dans la phase d'analyse du système.

I.3. L'état de fonctionnement du système de production :

La consommation énergétique d'un système de production est la somme de l'énergie consommée par ses différents organes. L'état de fonctionnement du système de production nous donne des connaissances sur le fonctionnement de chaque organe du système au cours du processus de fabrication. Dans l'ISO/DIS 14955-1 [ISO/DIS 14955-1], l'état de fonctionnement est la combinaison des différents états « ON », « OFF » des organes du système. Un exemple des états de fonctionnement pour une machine-outil est montré dans la Figure II. 2 :

<i>Exemples des états de fonctionnement</i>	Alimentation électrique	Commande de la machine	Unités périphériques	Unité de traitement de la machine	Unité de mouvement de la machine	Axes de la machine
Arrêt	Arrêt	Arrêt	Arrêt	Arrêt	Arrêt	Immobiles
Veille avec unités périphériques à l'arrêt	Marche	Marche	Arrêt	Arrêt	Arrêt	Immobiles
Veille avec unités périphériques en marche	Marche	Marche	Marche	Arrêt	Arrêt	Immobiles
Prête à fonctionner	Marche	Marche	Marche	Veille	Veille	Immobiles
Préchauffage	Marche	Marche	Marche	Marche pas d'usinage	Marche	En mouvement
Traitement en cours	Marche	Marche	Marche	Marche usinage	Marche	En mouvement

Figure II. 2 : Exemple de l'état de fonctionnement d'une machine-outil [ISO/DIS 14955-1]

La prise en compte des différents modes de fonctionnement des organes d'un système de production est importante pour l'analyse de la consommation énergétique du moyen de production. Elle permet d'identifier la consommation énergétique réelle de chaque organe du moyen de production en fonction de sa durée de fonctionnement.

I.4. Décomposition de la consommation énergétique :

La consommation énergétique d'une machine-outil peut être classifiée de différentes manières : la fonction, la décomposition de la machine, des composants, des états de fonctionnement, le type d'énergie... selon le besoin de recherche. La granulométrie de l'analyse de la consommation d'énergie affecte significativement la précision de calcul et la complexité du modèle de consommation d'énergie. La Figure II. 3 montre les différentes classifications de la consommation énergétique des machines-outils :

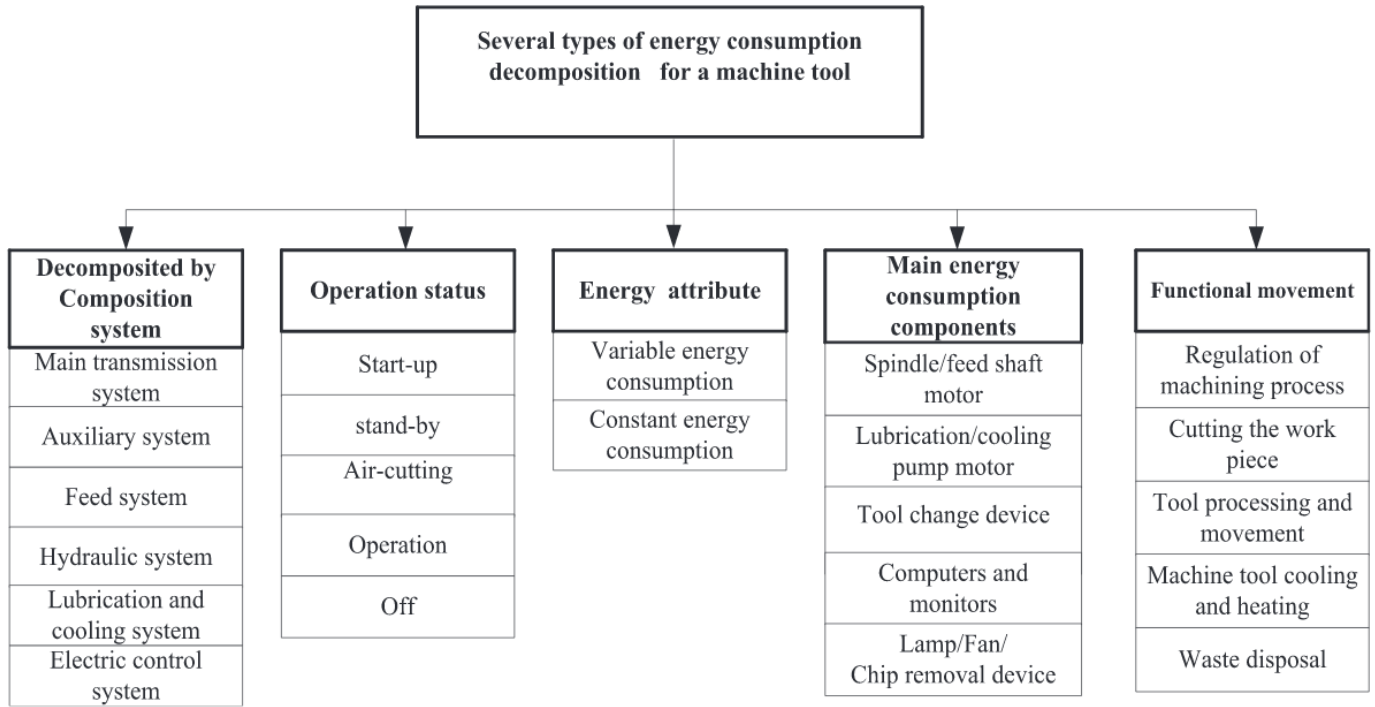


Figure II. 3. Exemple de différentes classifications de la consommation énergétique des machines-outils [Zhou et al., 2016]

Généralement, la consommation énergétique d'une machine-outil est répartie en une partie constante et une partie variable [Dahmus et al., 2004], [Gutowski et al., 2005]. Une étude menée par [Dahmus et al. 2004] sur 3 machines de fraisages différentes a montré qu'en fonction du type de machine, 30% à 50% d'énergie consommée par la machine est indépendante des actions à mener (Figure II. 4). Dans cette étude, la part d'énergie « start up » est celle consommée par l'ordinateur, le ventilateur... La part d'énergie dite « Constant run-time operation » est celle consommée pour amener l'outil de coupe et la pièce à usiner jusqu'à la position de travail. Dans une autre étude, près de 85,2% de l'énergie utilisée par une machine-outil est indépendante des opérations d'usinage (Figure II. 5).

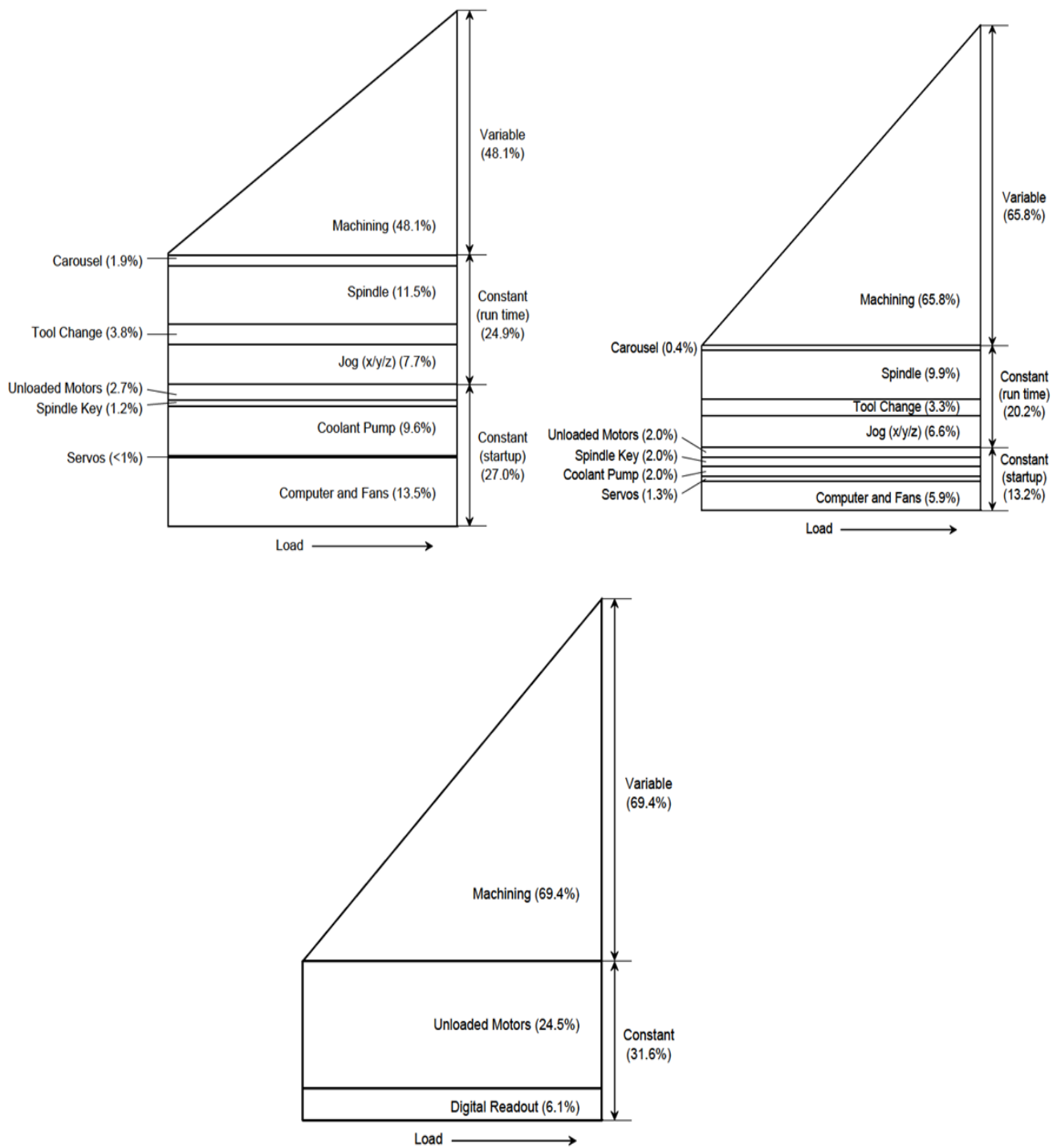


Figure II. 4. Répartition de la consommation d'énergie pour différentes fraiseuse automatisée [Dahmus et al, 2004]

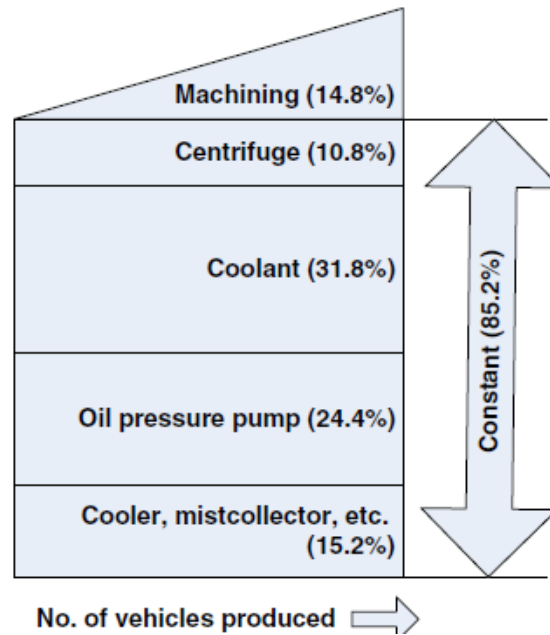


Figure II. 5. La décomposition de l'énergie consommée [Gutowski et al., 2005]

Nous pouvons constater que l'énergie consommée par un outil de production ne sert pas toute à la fabrication du produit. Il est donc important d'analyser la consommation énergétique du moyen de production de manière d'identifier quelle est la part d'énergie qui sert vraiment à la fabrication du produit. Prenons par exemple le cas d'une machine-outil. Certains organes de la machine-outil consomment de l'énergie dès la mise sous tension de la machine. D'autres composants consomment de l'énergie lorsqu'ils sont sollicités. La part de l'énergie liée à la fabrication du produit, c'est-à-dire l'énergie consommée par les composants lorsque la machine-outil produit du copeau est faible par rapport à la consommation d'énergie totale, (Figure II. 5)

Dans le travail de Devoldere et al. [Devoldere et al., 2007], les auteurs nous montrent que, pour une presse hydraulique, la part de l'énergie consommée apportant de la valeur au produit final, c'est-à-dire la part de l'énergie liée à la fabrication du produit, (mouvement du poinçon) est faible par rapport à la consommation totale. La Figure II. 6 illustre la répartition de l'énergie consommée d'une presse hydraulique en fonction des différents modes de production : mise en place de l'outil (1), préparation sur poste de commande PC (2), mise en place de la pièce à fabriquer (3-4), descente du poinçon (5a), montée du poinçon (5b), transport et mesure de la pièce finie (6-8) et temps de pause de l'opérateur (9). Cette Figure II. 6 montre qu'il y a 65% de l'énergie consommée sans apport de valeur au produit final.

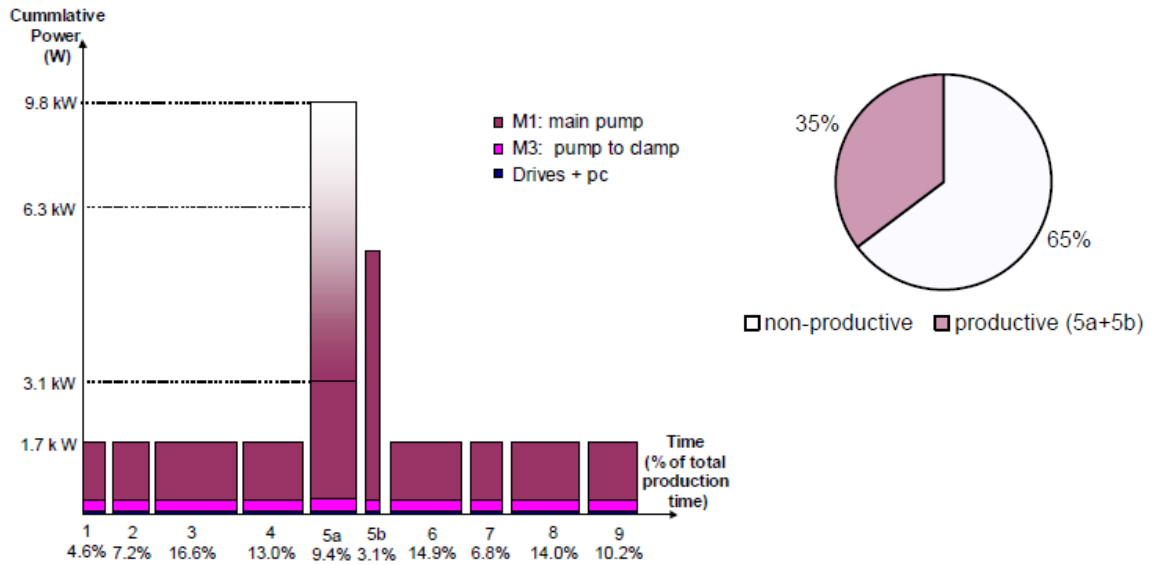


Figure II. 6. Consommation énergétique d'une presse hydraulique [Devoldere et al., 2007]

La Figure II. 7 nous montre également la consommation énergétique d'un centre d'usinage 5 axes en fonction de ses différents modes d'utilisation : mise sous tension (idle mode), déplacement rapide des axes sans produire du copeau (run time mode) et usinage (milling mode). Pendant 65% du temps, le centre d'usinage est non productif (idle time et run time) avec 47% de l'énergie consommée. La part de l'énergie qui n'apporte pas de valeur ajoutée au produit final reste importante.

A partir des constats ci-dessus nous remarquons qu'une part importante de l'énergie consommée par l'outil de production n'apporte pas de valeur au produit final. Cela nous permet de conclure qu'il est possible et nécessaire de mener les actions pour réduire la consommation énergétique des moyens de production.

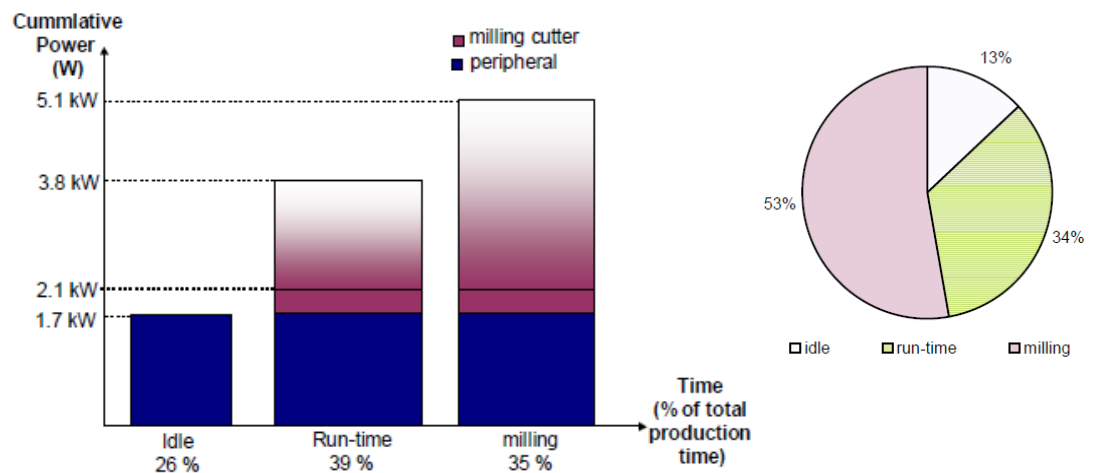


Figure II. 7. Consommation énergétique d'un centre d'usinage 5 axes [Devoldere et al., 2007]

I.5. La consommation énergétique d'un moyen de production :

L'énergie consommée par un moyen de production est fonction de deux facteurs : la puissance énergétique nécessaire (P) et le temps de production (t) :

$$E = P \cdot t$$

(Equation II. 1)

L'estimation de la consommation énergétique est un élément central dans le modèle de Schiefer pour évaluer les impacts environnementaux des procédés de fabrication [Schiefer 2000]. L'énergie consommée par la machine-outil se compose de 2 parties : une partie d'énergie consommée par le process (W_p) qui dépend des propriétés de matériaux, du choix de l'outil de coupe et des paramètres de procédé de fabrication ; une autre partie fixe consommée par les composants de la machine (W_f) qui fournissent les conditions nécessaires à l'accomplissement du bon fonctionnement de la machine (Figure II.8) [Zein, 2012]. L'énergie de coupe est calculée en se basant sur les paramètres de coupe. L'énergie demandée pour faire fonctionner la machine-outil dépend du temps de fonctionnement et de la puissance moyenne mesurée sur la machine-outil.

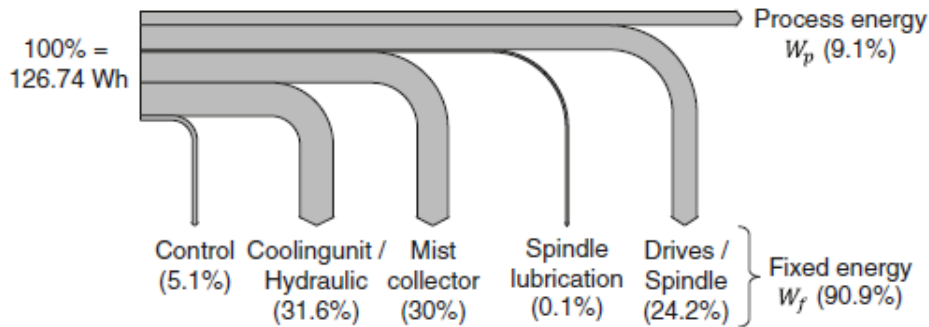


Figure II.8 : Flux d'énergie pour un processus d'enlèvement de matière [Zein, 2012]

Dans le travail de Gutowski et al. [Gutowski et al. 2006], une approche comparable décrivant la consommation d'énergie spécifique de la machine-outil est présentée. La consommation d'énergie spécifique (SEC), l'énergie consommée pour enlever 1 cm³ de matière, permet de comparer la consommation énergétique entre les différents processus d'enlèvement de matière. L'énergie SEC est exprimée par les équations :

$$P_{totale} = P_{fixed} + MRR \cdot k$$

(Equation II. 2)

$$SEC = \frac{P_{fixed}}{MRR} + k$$

La puissance fixe P_{fixed} est considérée comme une constante, la puissance de coupe est calculée en fonction du débit de matière enlevée MRR (*Material Removal Rate*) et la constante k est liée aux caractéristiques de la pièce à usiner et au procédé d'usinage [Gutowski et al. 2007].

Kara et Li [Kara et Li, 2011] présentent une approche empirique pour caractériser la relation entre la consommation d'énergie d'une machine-outil et les variables du processus d'enlèvement de matière. Des modèles empiriques sont appliqués à différents processus d'usinage : tournage, fraisage et à différents machines-outils afin de quantifier la consommation énergétique des machines-outils en fonction du débit de matière enlevée MRR . Ces modèles empiriques dépendent des caractéristiques spécifiques de chaque machine-outil et du procédé de fabrication. Par conséquent, la transférabilité du modèle empirique est restreinte.

Dans le travail de Dietmair et al. [Dietmaire et al., 2009], un modèle générique, basé sur la simulation des états discrets et les transitions, permet de prédire la consommation énergétique d'un moyen de production. Ce modèle comprend les états séquentiels et les transitions définissant les liens entre les états séquentiels d'un outil de production, voir Figure II.9. Par exemple, dans le cas d'une machine-outil, il existe différents états séquentiels comme : le démarrage de la machine, la mise en route de la broche, les phases d'usinage... Pour chaque état, la consommation d'énergie est déterminée à partir de l'accumulation de la consommation d'énergie des différents organes. Le modèle de consommation énergétique d'un moyen de production peut être paramétré en prenant, pour chaque état, les mesures de puissance des différents organes.

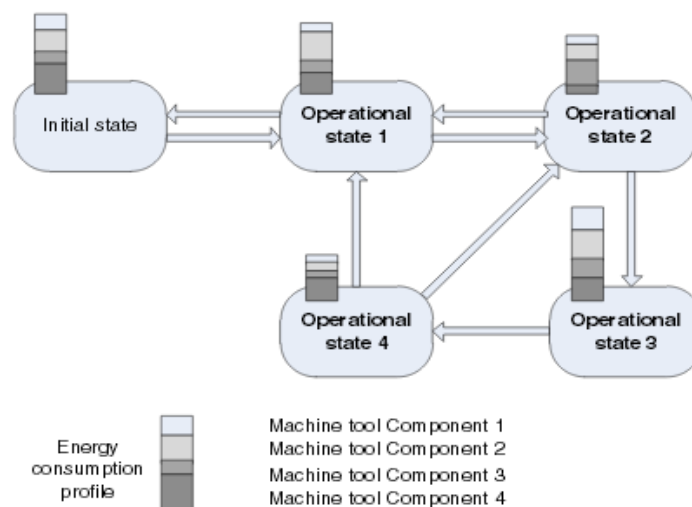


Figure II.9. L'état discret/ transition [Dietmaire et al., 2009]

Dans le cadre du projet CO₂PE (Cooperative Effort on Process Emissions in Manufacturing), Kellens et al. [Kellens et al., 2011] ont proposé une méthode d'inventorisation pour obtenir des informations sur les impacts environnementaux dans la phase d'utilisation de machines-outils (Figure II.10). Cette méthode comprend deux approches d'analyse : approche préliminaire (screening approach) et approche approfondie (in-depth approach) avec différents niveaux de détail d'analyse de l'utilisation d'énergie et les impacts environnementaux d'un système de fabrication. L'approche préliminaire nous donne les premières informations concernant la consommation énergétique du système de production. L'approche approfondie est divisée en quatre modules différents : étude du temps de fabrication, étude de la consommation énergétique, étude des consommables (matériaux, composants...), et une étude sur les émissions. Dans cette approche, toutes les entrées et sorties du processus de fabrication sont mesurées et analysées en détail.

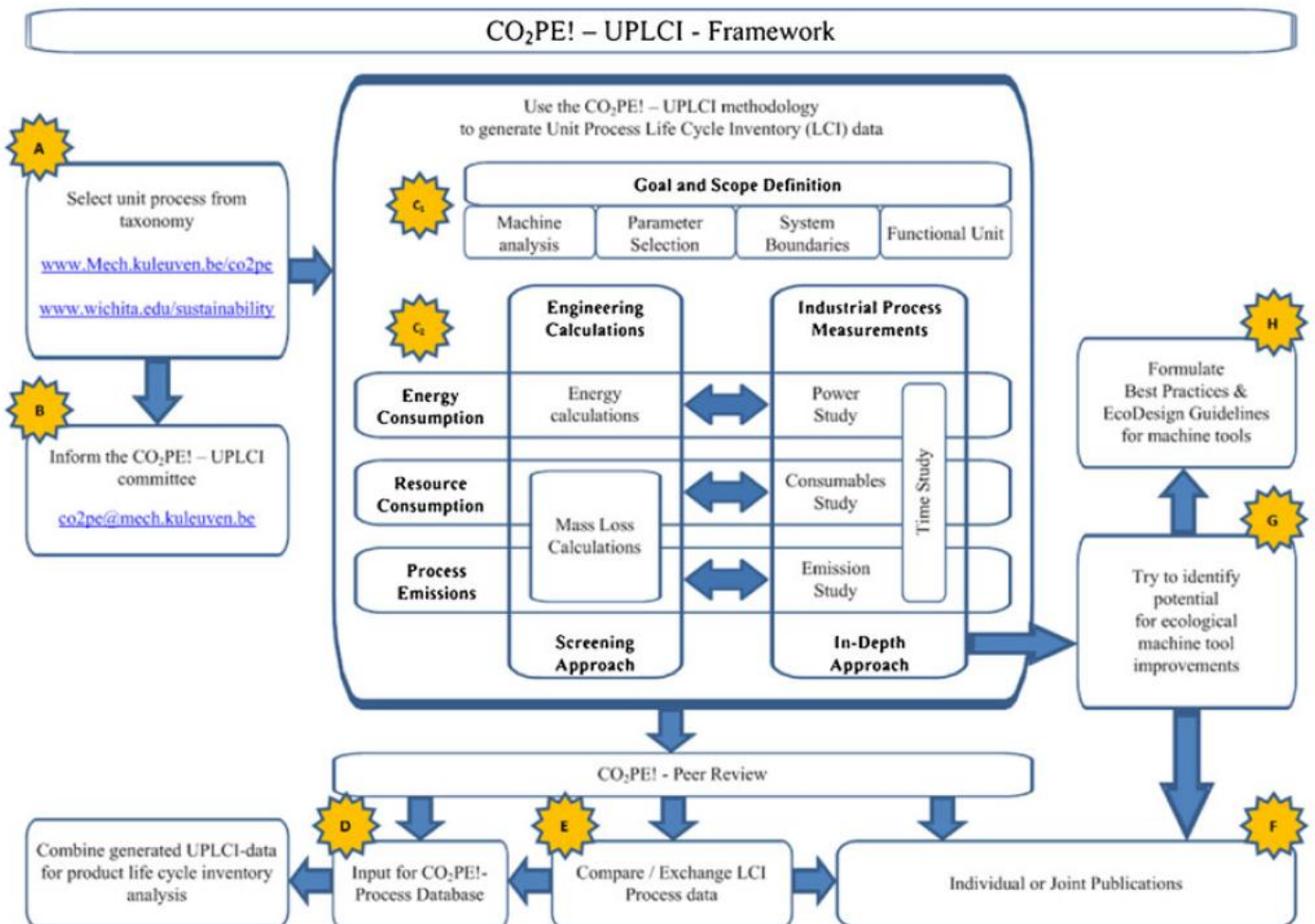


Figure II.10 : Le cadre du projet CO₂PE! [Kellens et al 2011]

Avram et al.,[Avram al., 2011] ont proposé une méthode pour modéliser la puissance consommée d'un moyen de production tout au long de l'usinage. Dans leur travail, l'énergie consommée par la broche et les axes est estimée en utilisant le modèle de prédiction d'effort de coupe. L'estimation de l'énergie consommée dans quatre cas d'études réalisées au sein de leur travail montre la nécessité de déterminer l'ensemble des paramètres pour prédire finement l'énergie consommée par les organes. Les auteurs utilisent également ce modèle de prédiction pour faire une comparaison énergétique entre différents processus de fabrication. Le Figure II.11 nous montre la comparaison entre l'usinage à grande vitesse et l'usinage conventionnel :

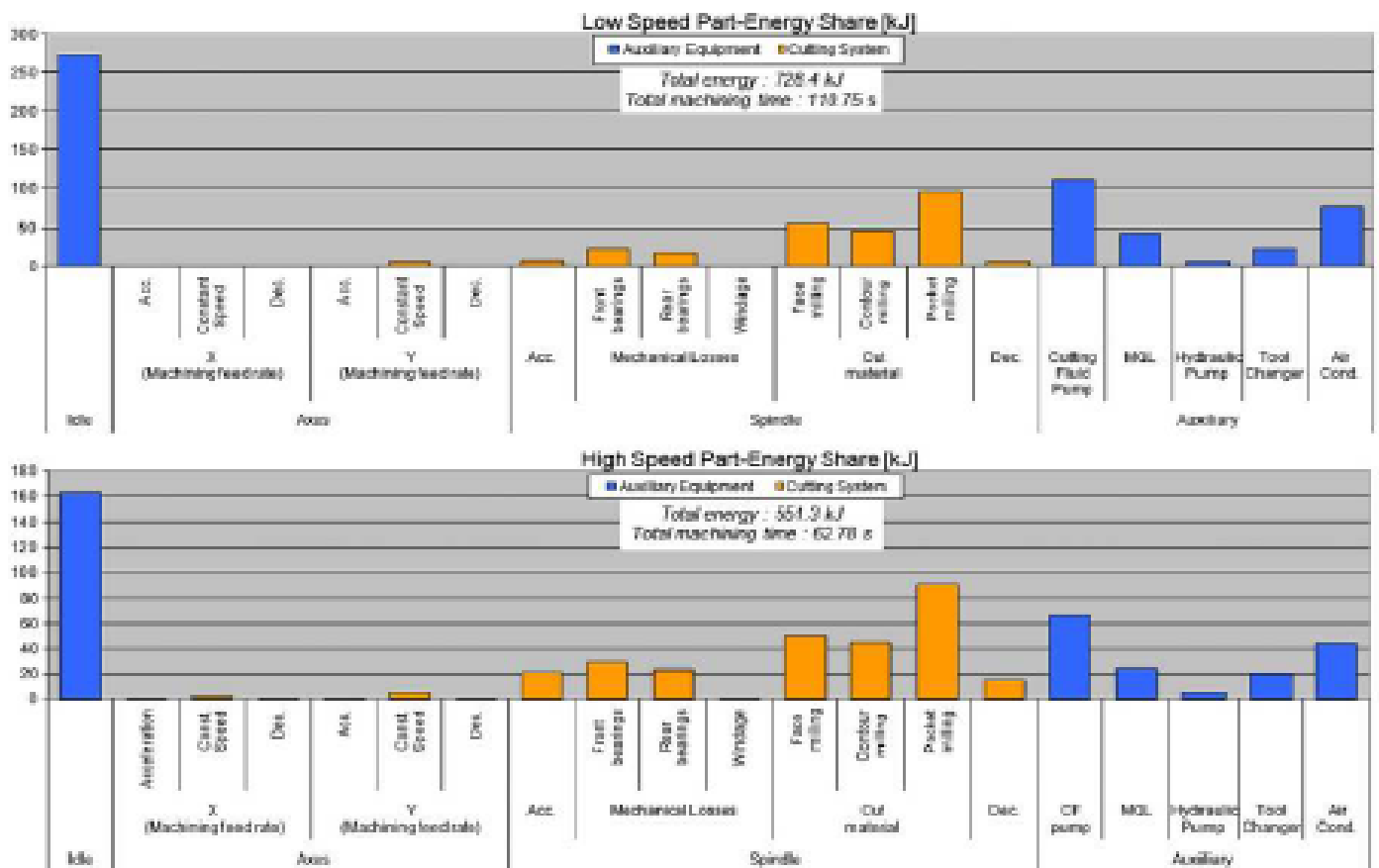


Figure II.11 : Comparaison énergétique des processus d'usinage [Avram et Xirouchakis, 2011]

Cette Figure II.11 nous montre qu'une grande partie de la puissance consommée provient de l'état sous tension de la machine-outil et que l'usinage conventionnel induit une augmentation de 32% de l'énergie consommée par rapport à l'usinage à grande vitesse.

II. L'efficacité énergétique :

II.1. Définition :

L'efficacité est définie comme un rapport entre la sortie et l'entrée nécessaire d'un système [DIN 9000]. Pour le cas de l'énergie, l'efficacité énergétique peut être formulée sous forme [EuP Directive 2005/32/EC, 2009] :

$$Efficacité\ énergétique_{générale} = \frac{\text{Résultat, service ou énergie}}{\text{Energie d'entrée du système fournie}} \quad (\text{Equation II. 3})$$

L'efficacité énergétique est un des indicateurs de la performance énergétique avec une diversité d'interprétations en fonction de la structure et du contexte d'application. Un classement de l'efficacité énergétique selon différentes approches reflétant le contexte spécifique est illustré dans le tableau ci-dessous [Patterson, 1996]

Classes of energy efficiency ratio	Segments	Ratio	Unit
Dimensionless quantitative rations	Thermodynamic (Energy quantity)	$\frac{\text{Useful energy output}}{\text{Total energy input}}$	[-]
	Thermodynamic (Energy quantity)	$\frac{\text{Actual energy input}}{\text{Ideal energy input}}$	[-]
	Economic	$\frac{\text{Economic quantity value}}{\text{Energy input cost}}$	[-]
Energy intensity(EI)/specific energy consumption(SEC)	Physical - thermodynamic	$\frac{\text{Energy input}}{\text{Physical quantity value}}$	e.g. [J/g]
	Economic- thermodynamic	$\frac{\text{Energy input}}{\text{Economic quantity value}}$	e.g. [J/€]

Tableau II. 1 : Classement de l'efficacité énergétique [Patterson, 1996]

L'efficacité énergétique d'un système de production est définie comme « un rapport ou une relation quantitative entre la sortie (la performance, service, produit ou énergie) et l'énergie d'entrée » [International Standard Organization, 2011]. Elle représente la relation entre le résultat obtenu et les ressources utilisés [ISO 9000:2005, 2005]. Dans le cas d'une machine-outil par exemple, les ressources utilisées sont : l'électricité, l'air comprimé...; le résultat obtenu est la pièce usinée.

II.2. Les actions permettant d'améliorer l'efficacité énergétique d'un moyen de production :

Actuellement, il y a beaucoup de travaux qui sont menés sur l'amélioration de l'efficacité énergétique d'un moyen de production. Nous présentons ici différentes pistes permettant d'améliorer l'efficacité énergétique, issues de la littérature.

✚ Le processus de fabrication :

- L'organisation du processus de fabrication :

Selon He et al. [He et al., 2011], un processus global de fabrication d'un produit est défini comme la réalisation d'un flux de pièces, soit par une machine-outil soit par plusieurs machines-outils différentes. La consommation énergétique du système de production dépend significativement de la flexibilité et de la variabilité du flux de pièces réalisées par le processus de fabrication (Figure II.12). Pour réaliser une même pièce, 2 processus de fabrication différents ont été analysés: dans le premier, la pièce est réalisée seulement par la machine 1 et la machine 5 tandis que dans le deuxième, la même pièce est réalisée par 3 machines différentes : machine 1, machine 2 et machine 5. Le résultat indique que l'énergie nécessaire dans ces 2 cas est différente (25Wh pour le premier processus proposé et 29Wh pour le deuxième).

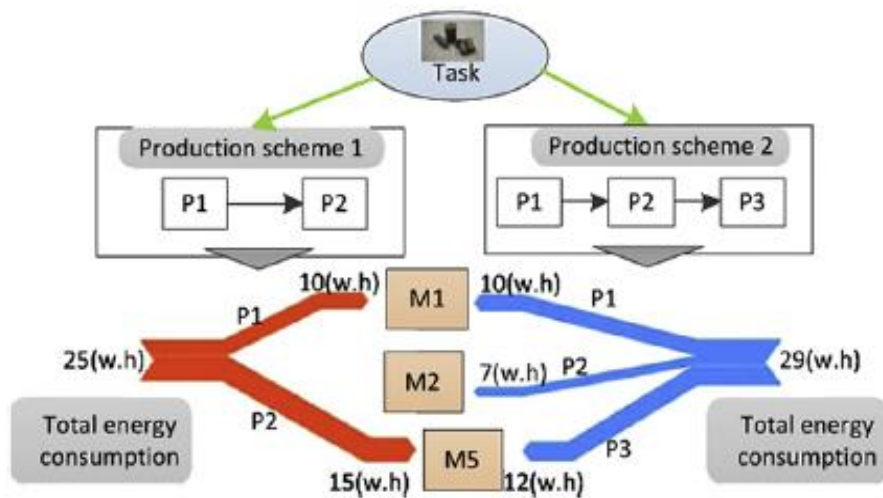


Figure II.12 : L'influence du flux de pièce d'un processus de fabrication sur la consommation énergétique

Au niveau du processus global de fabrication, He et al. [He et al., 2011] propose une modélisation du processus de fabrication du point de vue énergétique en se basant sur un graphe d'événements. Pour chaque machine, ils créent 3 états différents: « début »,

« fonctionnement » et « fin » de manière à séparer les phases de consommation énergétique comme le montre la Figure II.13.

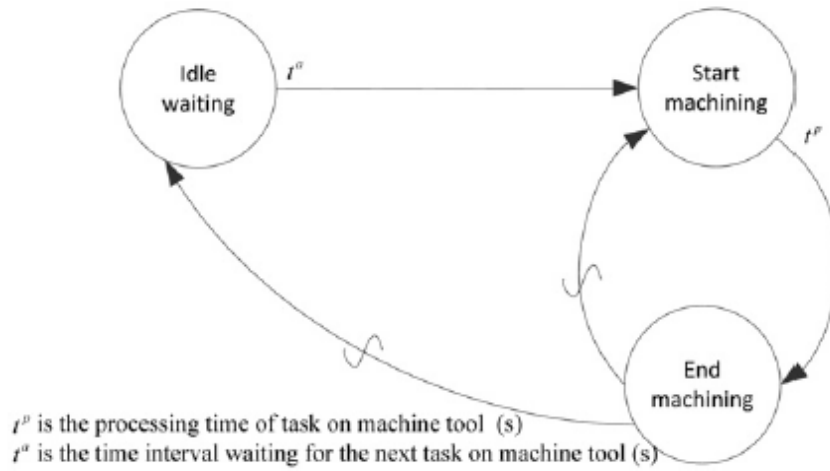


Figure II.13 : Modèle d'événement pour un cycle de consommation d'énergie [He et al., 2011]

Cette modélisation permet d'identifier les gains énergétiques possibles et de comparer la consommation énergétique de plusieurs processus de fabrication concurrents.

- *L'optimisation des conditions de fabrication :*

Les paramètres du process peuvent avoir une influence significative sur la consommation énergétique d'un moyen de production. Plusieurs méthodes d'optimisation des conditions de fabrication, afin de réduire la consommation d'énergie d'un moyen de production, ont été élaborées au cours des dernières années. Dans le travail de Diaz et al. [Diaz et al., 2009] ainsi de Mori et al. [Mori et al., 2011], les auteurs nous montrent que la consommation énergétique d'une machine de perçage, fraisage peut être réduite par l'optimisation des conditions de coupe comme la vitesse de coupe, la vitesse d'avance, la profondeur de coupe...

Dans les travaux de Yoon et al. [Yoon et al., 2013], Chen et al. [Chen et al., 1989], Hinduja et al. [Hinduja et al., 2004], et Lee et al. [Lee et al., 2000], les auteurs nous montrent que la consommation énergétique d'un moyen de production peut être réduite si les paramètres de coupe sont bien sélectionnés. En effet, l'efficacité énergétique d'une machine-outil s'améliore lorsque la productivité est maximale [Kara et Li, 2011], [Diaz et l., 2011] comme le montre

$$P_{totale} = P_{fixed} + MRR \cdot k \quad (\text{Equation II. 2})$$

$$SEC = \frac{P_{fixed}}{MRR} + k$$

La Figure II.14 montre également la relation inverse entre l'énergie spécifique consommée et le débit de matière enlevé. Plus la valeur de débit de matière enlevé MRR est élevée, plus la valeur de l'énergie spécifique consommée SEC est petite et donc l'efficacité énergétique de la machine est améliorée.

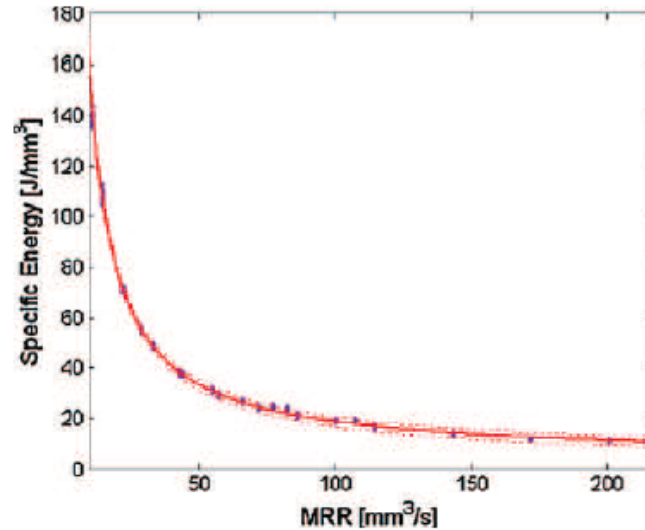


Figure II.14 : Relation entre l'énergie spécifique consommée et le débit d'enlèvement de matière [Diaz et al. 2011]

Chen et al. [Chen et al., 1989] ont développé un algorithme heuristique, pour optimiser les paramètres de coupe avec pour objectif de réduire la consommation énergétique, en utilisant différentes contraintes telles que : maximiser le débit de matière enlevé, maximiser la profondeur de coupe... La Figure II.15 nous montre également que pour améliorer l'efficacité énergétique, il faut maximiser la productivité de la machine afin d'obtenir un débit de matière enlevée maximum. Cela a été également montré dans le travail de Babu et al. [Babu et al., 2012]. En effet, en utilisant la méthode de Taguchi, Babu et al. ont conclu que la consommation énergétique d'un tour peut être réduite en augmentant le débit de matière enlevé.

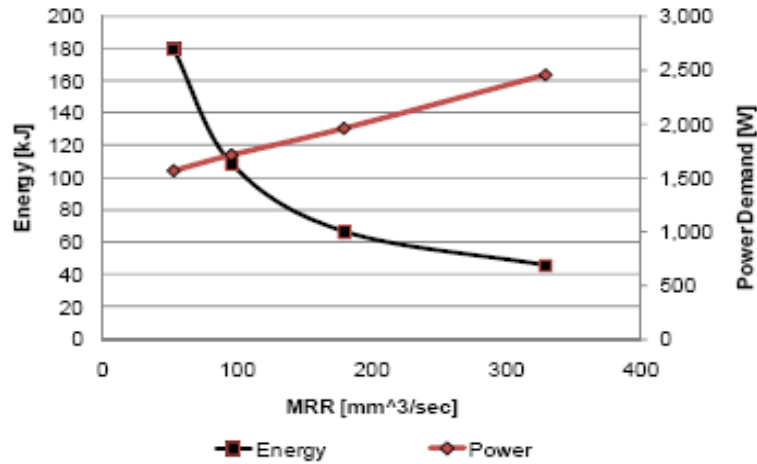


Figure II.15 : La relation entre l'énergie, la puissance consommée et le débit de matière enlevée pour une opération de fraisage [Kara et al., 2011]

Dans le travail de Mativenga et al. [Mativenga et al., 2011], une approche d'optimisation des conditions de coupe pour réduire la consommation énergétique d'un moyen de production a été également proposée avec comme objectif de minimiser la consommation énergétique d'un centre de tournage. Dans ces travaux, les auteurs proposent d'optimiser la durée de vie des outils de coupe afin de minimiser l'énergie consommée, en relation avec le coût énergétique nécessaire à la fabrication d'un produit. Les auteurs identifient les paramètres critiques dans la minimisation de la consommation énergétique, en se basant sur l'optimisation de la durée de vie des outils de coupe. Ces paramètres sont: l'énergie nécessaire à la mise en route de la machine-outil, l'énergie nécessaire à la réalisation d'une opération de fabrication, l'énergie consommée pendant le temps de changement des outils et l'empreinte énergétique due à la fabrication des outils de coupe. Les travaux montrent que le choix des conditions de coupe, basé sur le critère de l'énergie consommée minimum et le critère de coût de fabrication minimum, peut nous conduire à une réduction significative de 64% de l'énergie consommée, par rapport à l'utilisation des conditions de coupe recommandées par le fournisseur (Figure II.16). On peut aussi optimiser la durée de vie des outils de coupe afin de réduire l'empreinte énergétique d'un moyen de production.

	Parameter based of tool supplier	Mid range process parameter	Parameter based on minimum cost	Parameter based on minimum energy
Depth of cut (mm)	1.0	2.0	4.0	4.0
Feedrate (mm/rev)	0.3	0.3	0.15	0.15
Cutting velocity (m/min)	415	382	341	341
Number of passes	4	2	1	1
Total volume removed (mm ³)	59,112	59,112	59,112	59,112
Energy per volume removed (Ws/mm ³)	36.18	20.40	12.85	12.85
Energy footprint (kW)	2138.5	1206	760	760
% difference from tool supplier parameters	-	44	64	64
Cost/volume 1×10^{-5} (£/mm ³)	7.36	3.72	1.98	1.98
Total cost (£)	4.35	2.20	1.17	1.17

Figure II.16 : Comparaison des condition de coupe [Mativenga et al., 2011]

Il est admis que le temps de traitement d'une pièce est également une des variables importantes permettant d'améliorer l'efficacité énergétique d'un moyen de production. En effet, plus le temps de traitement est court, plus l'efficacité énergétique est meilleure. Ahmad et al. [Ahmad et al., 2005] ont développé un algorithme pour optimiser les paramètres de coupe d'une opération de fraisage au cours de laquelle le temps d'usinage est défini comme le critère d'optimisation principal. Dans le travail de Diaz et al. [Diaz et al., 2010], les auteurs nous montrent que l'optimisation des trajectoires d'usinage permet de réduire le temps de traitement de la pièce usinée et donc de réduire la valeur de l'énergie consommée. Cela est bien illustré par un cas d'étude réalisé sur un centre d'usinage 5 axes. La machine-outil est utilisée pour fabriquer une poche avec 5 trajectoires d'usinage différentes (a, b, c, d, e) (Figure II.17). Le résultat nous montre que plus la trajectoire d'usinage est courte, plus la durée de fabrication est courte et donc la valeur de l'énergie consommée est plus faible comme c'est le cas pour la trajectoire d'usinage (a).

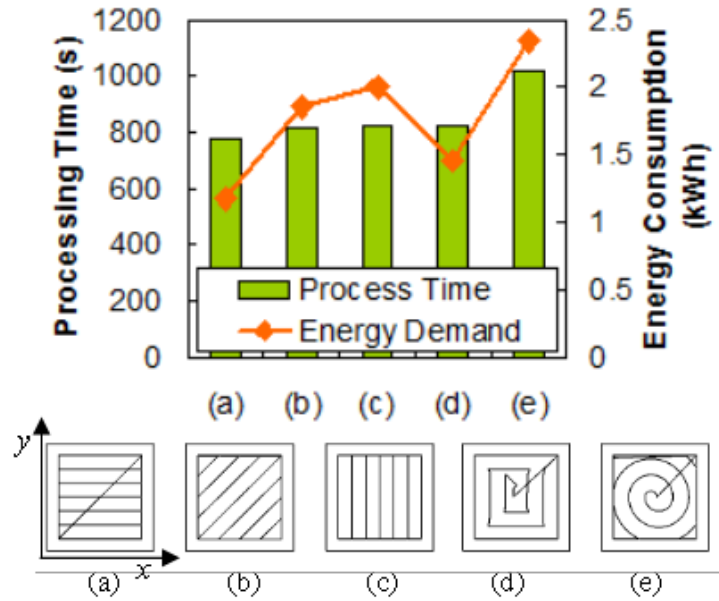


Figure II.17 : L'énergie consommée en fonction de la trajectoire de fabrication
[Diaz et al. 2010]

- *Evolution des procédés de fabrication :*

La consommation de ressources telles que le lubrifiant ou l'air comprimé peut générer des impacts environnementaux. L'évolution du procédé de fabrication peut donc nous permettre de réduire les impacts environnementaux et la consommation énergétique. Prenons par exemple le cas de l'usinage à sec ou avec micro lubrification. L'absence de lubrification ou l'utilisation d'un dispositif de micro lubrification permet non seulement de limiter la consommation énergétique de la pompe à lubrifiant mais également d'éliminer les opérations de traitements du lubrifiant, de faciliter le traitement des copeaux et de faciliter le nettoyage de la pièce. Dans le travail de Paris et al. [Paris et al., 2012], les auteurs ont fait une étude comparative des impacts environnementaux entre le perçage traditionnel et le perçage vibratoire (perçage à sec) à l'aide de forets similaires. Les résultats nous montrent que l'utilisation de la lubrification dans le perçage traditionnel génère 90% des impacts environnementaux. Ces impacts environnementaux sont dus principalement à l'énergie nécessaire pour produire le lubrifiant et le traiter en fin de vie, à l'utilisation de la pompe à lubrifiant durant l'opération de perçage et à l'énergie consommée pour le broyage et l'essorage des copeaux.

L'évolution des procédés de fabrication est une des approches permettant de diminuer la consommation énergétique du moyen de production. Cependant, il faut analyser plus largement le site de production pour quantifier le gain énergétique obtenu.

La structure de l'outil de production :

L'une des possibilités de réduction de la consommation énergétique d'un moyen de production est l'utilisation de composants plus efficaces en termes d'énergie consommée. Plusieurs travaux se concentrent sur cette voie pour réduire la consommation énergétique du moyen de production. Dans le travail de Brecher et al. [Brecher et al., 2013], la consommation énergétique de différents types de système hydrauliques d'une machine-outil a été analysée et comparée, permettant ainsi de proposer une réduction de l'énergie consommée par le système hydraulique. Dans le travail de Kroll et al. [Kroll et al., 2011], l'idée d'alléger les parties en mouvement d'une machine-outil, permettant de réduire la consommation énergétique totale de la machine-outil, a été proposée. L'objectif d'alléger les structures de différentes parties de la machine-outil est de réduire la masse des parties en mouvement en respectant la rigidité de la machine. Dans ces travaux, les auteurs identifient trois approches pour réduire la masse des structures de la machine : le choix de matériaux, la géométrie des pièces et l'assistance électronique de machines moins rigides. Les résultats obtenus dans ces travaux nous montrent que les nouveaux de matériaux à bases de composites ou renforcés permettent d'atteindre une réduction de 60% de la masse des structures et le gain énergétique obtenu dans ce cas est de 19%.

En conclusion, les références bibliographiques concernant l'amélioration de l'efficacité énergétique d'un moyen de production ont montré que les recherches existantes sont très segmentées. Beaucoup de recherches se concentrent soit sur l'optimisation des conditions de production comme l'optimisation des paramètres de production et l'organisation du processus de fabrication, soit sur l'amélioration de l'efficacité énergétique de certains composants du moyen de production (groupe hydraulique, broche...) mais peu sur la conception de l'outil de production lui-même afin de réduire la consommation énergétique.

III. Conception pour l'efficacité énergétique :

III.1. Conception pour X

La conception pour X noté DFX pour « Design for X » a émergé à la fin des années 50s [Pech, 1973]. C'est un ensemble de méthodes où « X » représente l'une des phases du cycle de vie du produit. L'objectif de la conception pour X est d'améliorer la conception par l'intégration des contraintes et des exigences dans la conception [Huang, 1996], [Kuo, 2001]. La conception pour X se concentre initialement sur les phases de fabrication (DFM)

[O'Driscoll, 2002] et d'assemblage (DFA) [Boothroyd et al., 1983]. Le développement de ces méthodes a par la suite permis d'étendre le concept à un plus large champ de métiers intervenants dans le processus de conception et de développement des produits : Design For Environnement (DFE), Design For Quality (DFQ), Design For Cost (DFC), etc [Huang, 1996]

Chaque DFX a son propre objectif comme par exemple : augmenter le nombre de composants à recycler (DFR), réduire le coût de production (DFC), réduire l'impact environnemental (DFE)... Chaque DFX regroupe un ensemble d'informations, de connaissances, de recommandations permettant de guider les concepteurs dans le développement du produit [Kuo et al., 2001].

Ces dernières années, une contrainte supplémentaire, l'efficacité énergétique, a été ajoutée dans la conception du moyen de production. En s'inspirant de la conception pour X, l'approche de la conception pour l'efficacité énergétique est devenue une des approches qui suscite le plus d'intérêt auprès des chercheurs et des industriels. Les paragraphes suivants font état des divers travaux de recherche dans le domaine de la conception pour l'efficacité énergétique.

III.2. La conception pour l'efficacité énergétique :

La conception pour l'efficacité énergétique vise à améliorer l'efficacité énergétique du moyen de production en intégrant une contrainte supplémentaire : l'efficacité énergétique.

Actuellement, il y a peu de travaux sur le développement d'une méthodologie de conception qui nous permette d'intégrer l'efficacité énergétique comme une des exigences essentielles dans la conception d'un outil de production. Zein et al. [Zein et al., 2011] utilise la conception axiomatique comme un outil systématique permettant de structurer les pistes d'amélioration potentielles afin de diminuer la consommation énergétique du moyen de production. La conception axiomatique est une méthode de conception qui se base sur 3 concepts principaux : le processus de mappage, la conception sous forme d'axiomes et les dépendances fonctionnelles. Le processus de conception est divisé en quatre domaines : le domaine client, le domaine fonctionnel, le domaine physique et le domaine du processus. La transition d'un domaine à un autre est appelée processus de mappage. Le processus de conception est représenté dans la Figure II.18 ci-dessous :

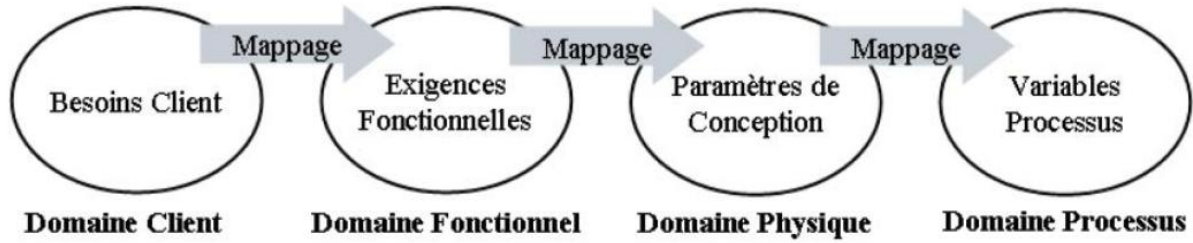


Figure II.18 : Le processus de conception axiomatique

Dans cette figure, le domaine client décrit les besoins clients, c'est à dire ce que cherche le client dans le produit à concevoir. Dans le domaine fonctionnel les besoins clients sont exprimés en termes d'exigences fonctionnelles (notées FRs). Pour satisfaire les exigences fonctionnelles (FRs), les paramètres de conception (notés DP) sont associés aux principes physiques retenus. Enfin un processus est développé pour fabriquer le produit. Ce processus est caractérisé par des variables processus (notées PVs) dans le domaine processus.

La relation entre l'exigence fonctionnelle et le paramètre de conception à chaque niveau hiérarchique de la conception axiomatique est exprimée par l'équation :

$$\begin{bmatrix} FR_1 \\ FR_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} DP_1 \\ DP_2 \end{bmatrix} \quad (\text{Equation II. 4})$$

Avec :

FR : Exigence fonctionnelle (functional requirement).

DP : Paramètre de conception (design parameter).

Une machine-outil sert d'exemple pour montrer l'utilisation de la conception axiomatique afin de minimiser sa consommation énergétique. Une décomposition hiérarchique a été réalisée avec l'objectif de minimiser la consommation énergétique de la machine-outil pour effectuer un cycle d'usinage. Le résultat montre la relation entre l'exigence fonctionnelle FR« minimisation de l'énergie consommée » et les paramètres de conception permettant de répondre à cette exigence fonctionnelle aux 4 premiers niveaux de décomposition, voir Figure II.19. A partir d'une exigence fonctionnelle initiale FR1 « Minimize energy demand of a machining process », dans les niveaux de décomposition suivants, les paramètres de conception DPs sont dérivés afin de répondre aux sous-exigences fonctionnelles correspondantes FR11 « Minimize energy input », FR12 « Reuse energy », FR13 « Recover energy losses », FR111 « Minimize operation time of a machining process ».

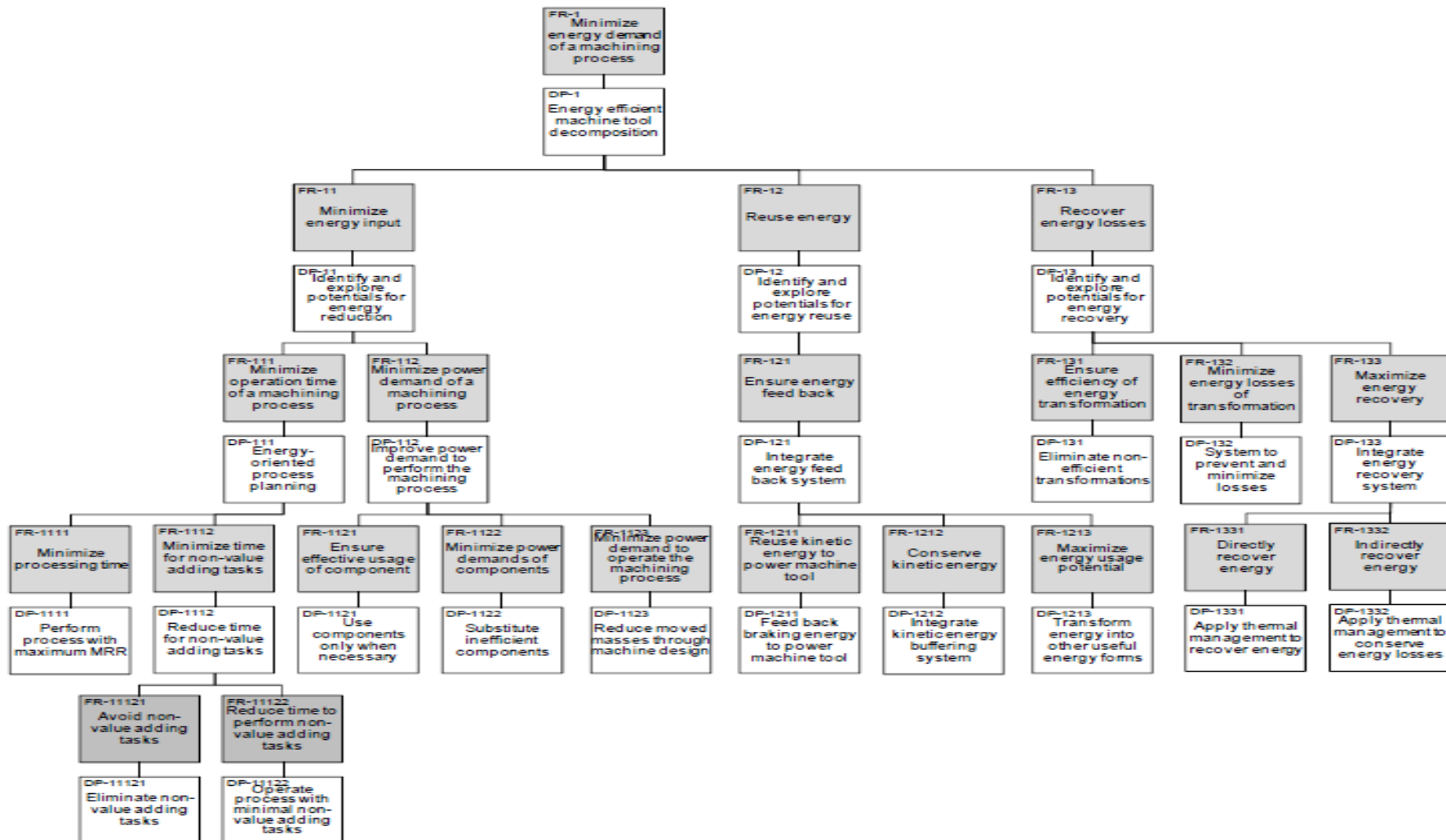


Figure II.19 : Les 4 premiers niveaux de décomposition dans la conception

Dans le travail de Neugebauer et al. [Neugebauer et al., 2010], les auteurs proposent également une approche de conception de l'outil de production permettant de diminuer sa consommation énergétique. Cette méthodologie est basée sur le concept de « property-driven design methodology » proposé par Weber [Weber, 2007]. Dans ce concept, le processus de conception est défini comme un compromis entre les exigences (par exemple : productivité, qualité de la surface usinée...) et les caractéristiques définies (par exemple : géométrie, matériau...) permettant d'atteindre ces exigences proposées. L'utilisation du concept « property driven design methodology » dans le contexte de conception de l'outil de production avec pour objectif d'améliorer l'efficacité énergétique est réalisé en intégrant une exigence supplémentaire « l'efficacité énergétique » dans le processus de conception.

La conception pour l'efficacité énergétique proposée par Neugebauer et al. se compose de 4 étapes principales, voir Figure II.20:

- *Définition de l'objectif* : l'efficacité énergétique du moyen de production
- *Analyse de la consommation énergétique de la machine-outil actuelle* : l'objectif de cette étape est d'identifier les composants de la machine-outil qui contribuent majoritairement à la consommation énergétique totale de la machine. Les connaissances de la consommation énergétique des différents organes de l'outil de production sont nécessaires dans cette étape. Elles sont déterminées par les étapes expérimentales.
- *Proposition des solutions* : les solutions permettant de réduire l'énergie consommée sont proposées.
- *Vérification* : les outils permettant de valider le gain énergétique obtenu sont proposés dans cette étape.

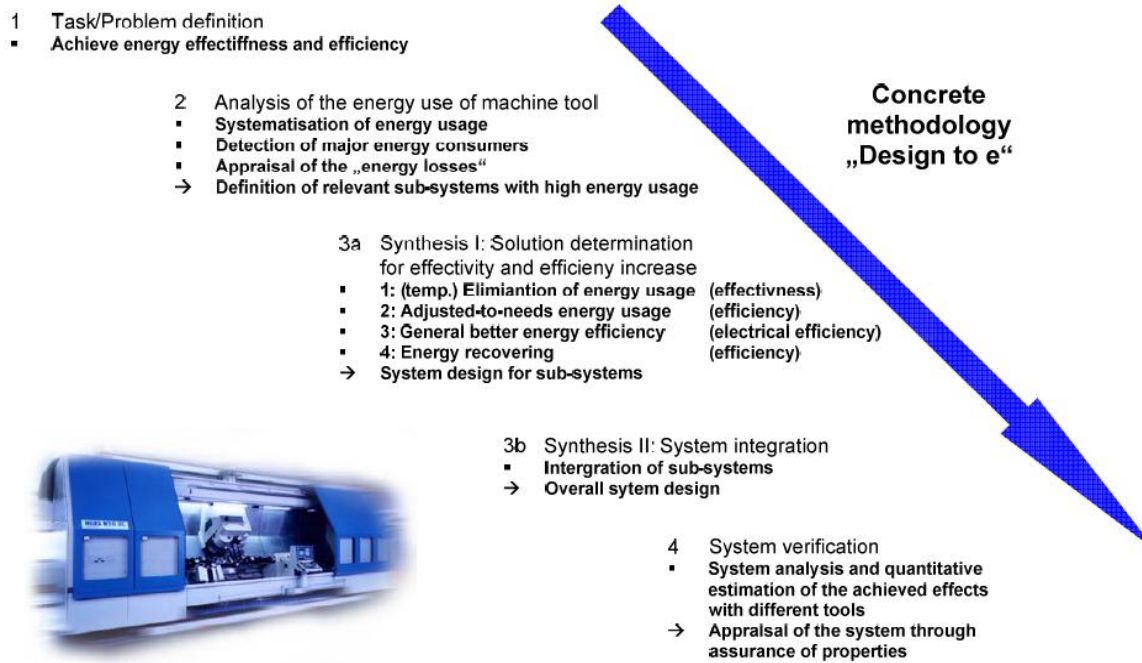


Figure II.20 : Conception pour l'efficacité énergétique [Neugebauer et al., 2010]

III.3. Les limites et différentes approches issues de la littérature

L'étude bibliographique montre qu'il existe actuellement différents axes de développement permettant de réduire l'empreinte écologique d'un système de production.

Dans le premier axe, les actions portent principalement sur l'optimisation des conditions de fabrication comme, l'optimisation des paramètres de fabrication, l'organisation du processus de fabrication... Généralement, les conditions de fabrication sont déjà optimisées afin de répondre aux différents critères de production : qualité du produit final, productivité du moyen de production... Le gain énergétique potentiel obtenu avec cette approche reste donc faible.

Le second axe comprend les actions liées à la structure du moyen de production. Actuellement, plusieurs études se concentrent sur cet axe de recherche. Par contre, ces études de recherche sont très disparates. En effet, les actions de réduction de la consommation énergétique portent sur l'optimisation de l'efficacité énergétique des différents organes du moyen de production, pris en compte individuellement. Cependant, l'amélioration de l'efficacité énergétique d'un moyen de production n'est pas la somme des résultats d'amélioration portés individuellement par les différents organes, de façon locale. Cela nous pousse à poser la question de l'amélioration de l'efficacité énergétique du moyen de production dans son intégralité.

Les études de recherche récentes ont pour objectif d'intégrer l'aspect de l'efficacité énergétique dans la conception de l'outil de production. En effet, l'analyse des travaux existants permet de mettre en évidence l'importance de l'intégration de l'aspect de l'efficacité énergétique dans la (re)conception d'un outil de production afin de réduire sa consommation énergétique.

Par contre, une des limites dans les travaux est le manque d'approche systématique dans l'étape d'analyse de l'efficacité énergétique du moyen de production et de ses organes. En effet, dans les travaux concernant la conception pour l'efficacité énergétique présentés ci-dessus, la consommation énergétique des différents organes du moyen de production est obtenue par l'étape expérimentale. Ensuite, selon la contribution énergétique de chaque organe, les organes contribuant majoritairement à la consommation d'énergie totale sont supposés avoir également une possibilité d'économie d'énergie élevée. Il n'y a aucun d'outil d'évaluation de l'efficacité énergétique proposé. Il est donc nécessaire dans l'étape d'analyse de proposer une méthode d'évaluation afin d'analyser l'efficacité énergétique de l'outil de production et de ses organes.

Une autre limite de ces travaux est la proposition d'actions d'amélioration de l'efficacité énergétique. En effet, les actions d'amélioration sont proposées de manière individuelle sur les organes qui sont les plus consommateurs d'énergie. Les travaux futurs devront porter sur l'amélioration de l'efficacité énergétique du moyen de production en prenant en compte toutes les interactions énergétique et les transferts d'impacts entre les différents organes du moyen de production.

IV. Conclusion :

A partir des constats ci-dessus, nous proposons d'orienter notre travail vers la proposition d'une méthodologie de reconception d'un moyen de production, avec comme objectif de diminuer sa consommation énergétique. Tout d'abord, nous avons pour objectifs une analyse de l'efficacité énergétique du moyen de production et de ses organes. Cela nous permettra d'avoir une cartographie complète de la consommation énergétique de l'outil de production. La question que nous nous posons actuellement est : quelle méthode nous permet d'analyser et d'évaluer l'efficacité énergétique du moyen de production et de ses organes ? De quel niveau de détail a-t-on besoin pour cartographier la consommation énergétique du moyen de production ? Une autre question soulevée concerne la proposition de stratégies de reconception du moyen de production: quelle méthode permet de générer les scénarios de

reconception en prenant en compte l'interaction énergétique entre les différents organes du moyen de production ?

CHAPITRE III : Analyse du moyen de production dans la (re)conception pour l'efficacité énergétique

SOMMAIRE

<i>CHAPITRE III : Analyse du moyen de production dans la (re)conception pour l'efficacité énergétique</i>	42
I. La conception pour l'efficacité énergétique :	44
II. L'outil d'évaluation de l'efficacité énergétique	46
II.1. L'énergie participant à l'apport de valeur ajoutée au produit	46
II.2. Modèle de calcul de l'énergie valorisée consommation énergétique :	47
II.3. Répartition d'énergie de la « cible idéale » :	49
II.4. Indicateur d'efficacité énergétique :	52
II.5. Le gain énergétique potentiel :	54
III. Analyse du moyen de production :	55
III.1. Critère de décomposition :	55
III.2. Méthode d'analyse du moyen de production :	58
IV. Exemple :	59
IV.1. Description du centre d'usinage :	59
IV.2. Opération de coupe :	60
IV.3. Analyse énergétique de la machine :	60
IV.3.1. L'énergie réelle consommée des organes de la machine-outil :	60
IV.3.2. Identification de la cible idéale :	61
IV.3.3. Répartition de la cible idéale :	64
IV.3.4. Calcul du gain énergétique G_i des différents éléments de la machine :	65
IV.3.5. Analyse énergétique de la machine :	66
V. Conclusion :	69

Résumé du chapitre

L'objectif de ce chapitre est de proposer une méthode d'analyse du moyen de production dans le contexte de (re)conception pour l'efficacité énergétique. Nous débutons ce chapitre par la présentation générale de la conception pour l'efficacité énergétique. Une répartition de la consommation énergétique est ensuite présentée ainsi qu'un indicateur d'efficacité énergétique permettant d'évaluer le moyen de production et ses différents organes. A la fin de ce chapitre, une méthode d'analyse permettant d'avoir une cartographie avec l'ensemble des informations concernant le gain énergétique potentiel des différents organes du moyen de production et un exemple d'application sont présentés.

I. La conception pour l'efficacité énergétique :

La conception pour l'efficacité énergétique s'est développée significativement ces dernières années. C'est une approche qui s'inspire des approches génériques de type DFX. L'objectif est de prendre en compte l'efficacité énergétique dans la phase de (re)conception d'un moyen de production dans le but de réduire sa consommation énergétique. Dans notre travail, nous nous basons sur la conception pour l'efficacité énergétique dans la phase de reconception un outil de production en gardant le procédé de fabrication inchangé.

Un procédé de fabrication est un ensemble de techniques permettant d'obtenir une pièce ou un objet par transformation de matière brute. Il permet donc de faire évoluer le produit en utilisant un moyen de production. Le terme d'évolution du produit est utilisé ici pour indiquer la transformation du produit d'un état A à un état désiré B. Par exemple, dans le cas de l'usinage, l'évolution du produit correspond aux changements de la forme ou des caractéristiques du produit par rapport à la matière d'entrée.

La part d'énergie consommée par un moyen de production est en réalité beaucoup plus élevée que celle nécessaire pour réaliser uniquement l'évolution du produit. L'idée de la conception pour l'efficacité énergétique est de tendre vers une « cible idéale » qui est définie comme la part d'énergie strictement nécessaire au moyen de production pour réaliser l'évolution du produit. Prenons le cas d'une machine-outil, la « cible idéale » est l'énergie strictement nécessaire pour réaliser l'enlèvement de matière.

La conception pour l'efficacité énergétique s'articule autour de deux phases : une phase d'analyse et une phase de proposition de reconceptions alternatives comme le montre la Figure III. 1:

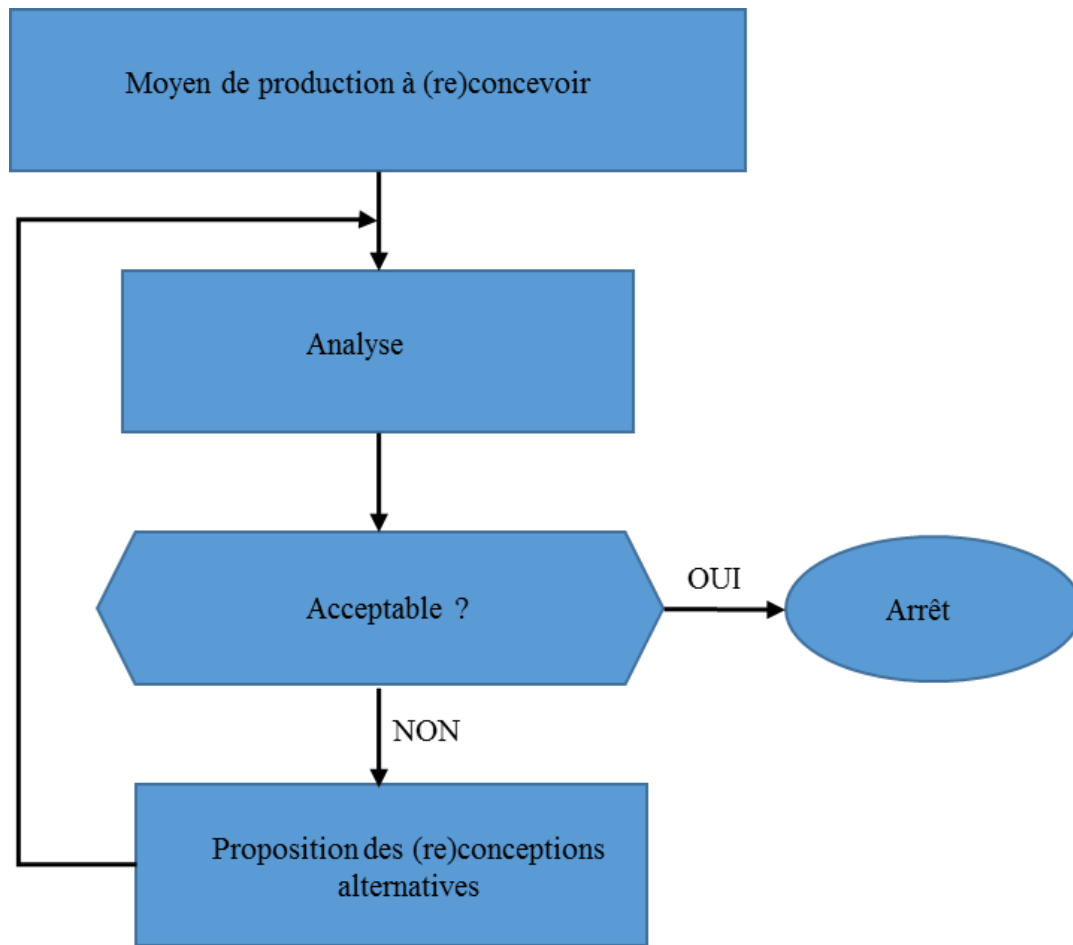


Figure III. 1 : La conception pour l'efficacité énergétique

Dans la phase d'analyse, la conception actuelle du moyen de production est évaluée en quantifiant « l'écart » entre la consommation énergétique réelle et la « cible idéale » identifiée préalablement. Cela nous donne l'efficacité de la conception actuelle. Plus cet «écart » est grand, plus l'efficacité de la conception actuelle est faible. Dans le but d'identifier quels sont les organes à repenser pour améliorer l'efficacité du moyen de production, l'évaluation de l'efficacité est réalisée en se basant sur un indicateur d'efficacité énergétique, présenté dans le reste du chapitre.

La phase de reconceptions alternatives visant à proposer des modifications de la conception actuelle, afin de tendre vers la « cible idéale », est présentée dans le chapitre IV de ce manuscrit.

II. L'outil d'évaluation de l'efficacité énergétique :

II.1. L'énergie participant à ajouter de la valeur au produit :

Un moyen de production se compose de différents organes. La consommation énergétique totale du moyen de production est donc la somme de l'énergie consommée par les différents organes. L'énergie consommée par le moyen de production ne participe pas pleinement à ajouter de la valeur au produit. Le terme « valeur ajoutée » utilisé ici correspond à l'évolution du produit après son passage sur le moyen de production. Le procédé de fabrication est consommateur de ressources et d'énergie d'entrée pour réaliser une évolution du produit et génère également des déchets. De la même façon, l'énergie consommée par le moyen de production dans la phase de fabrication ne sert pas intégralement à la fabrication du produit. Il existe toujours une part d'énergie perdue qui reste importante. Dans la conception pour l'efficacité énergétique, l'objectif est de réduire cette part d'énergie perdue pour tendre vers la cible idéale.

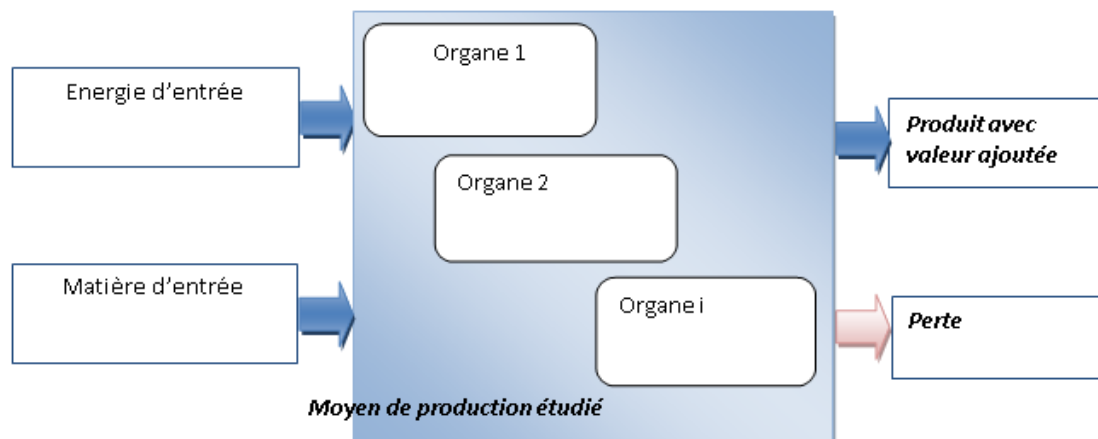


Figure III. 2 : Les sources d'entrées et de sorties du moyen de production

Il est donc nécessaire d'évaluer la consommation énergétique des organes du moyen de production de manière d'identifier quelle est la part d'énergie qui sert à ajouter de la valeur au produit et quelle est la part d'énergie qui est perdue.

L'énergie ajoutant de la valeur au produit est définie comme l'énergie strictement nécessaire pour réaliser les actions indispensables, ne pouvant pas être éliminées, dans la phase de production dans le but d'ajouter de la valeur au produit. Dans cadre de notre travail, cette énergie est nommée « énergie valorisée » **E**valorisée.

Par exemple, dans le cas d'une presse hydraulique dans la Figure III. 3, les actions dans la phase de production permettant de réaliser un poinçonnage sont : la mise en place de la pièce à fabriquer, la descente du poinçon, la montée du poinçon. Parmi ces actions, l'action

indispensable pour fabriquer un produit avec valeur ajoutée est l'action de la descente du poinçon. L'énergie valorisée dans ce cas est l'énergie strictement nécessaire pour réaliser l'action de descente du poinçon.

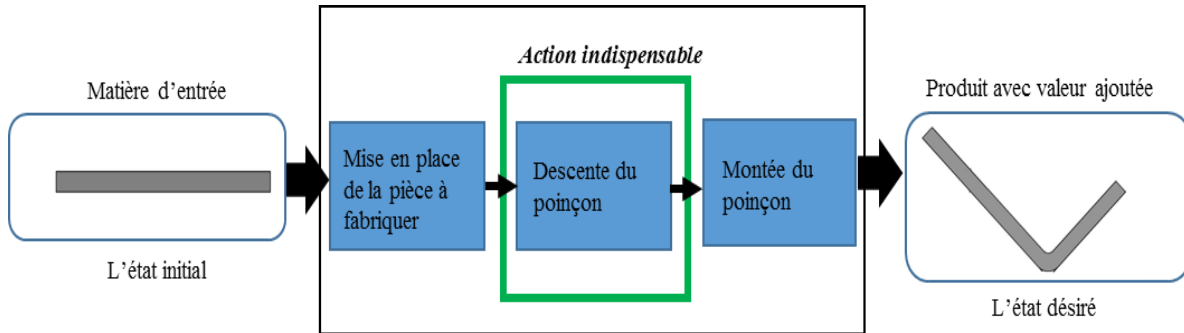


Figure III. 3 :L'action indispensable dans le cas d'une presse hydraulique

Dans le cas de l'usinage où la machine-outil réalise un changement d'outil après chaque opération de coupe, les actions indispensables dans la phase de production permettant de créer la valeur ajoutée au produit sont celles consommées pour réaliser l'enlèvement de matière : le changement de l'outil de coupe, l'enlèvement de matière et la lubrification du procédé de coupe. L'énergie valorisée dans ce cas est donc la somme de :

- L'énergie nécessaire pour réaliser un enlèvement de matière
- L'énergie nécessaire pour réaliser un changement d'outil de coupe
- L'énergie nécessaire pour évacuer la chaleur qui se produit au contact Pièce- Outil lors de la production du copeau.

II.2. Modèle de calcul de l'énergie valorisée:

L'énergie valorisée est identifiée à partir des connaissances relatives au procédé de fabrication et au moyen de production.

❖ Connaissance du procédé de fabrication ($K_{\text{procédé de fabrication}}$)

Il s'agit des informations liées au procédé de fabrication. Comme souligné au début de ce mémoire, dans le cadre de notre travail, le procédé de fabrication initial est inchangé. Nous avons donc la capacité de disposer de toutes les informations issues des connaissances du procédé de fabrication pour calculer la valeur de l'énergie valorisée du moyen de production et de ses différents organes.

Par exemple dans le cas d'une machine-outil, l'énergie valorisée pour réaliser un enlèvement de matière est calculée en fonction du volume de matière enlevée V et de la consommation d'énergie spécifique SEC :

$$E = SEC.V \quad (\text{Equation III. 1})$$

Dans le cas d'un procédé de moulage, à partir des connaissances du procédé, la valeur de l'énergie valorisée nécessaire permettant de fondre une certaine quantité de métal peut être calculée en utilisant l'équation suivante [Ashby et al., 2008] :

$$E = m.c.(T_m - T) + m.L \quad (\text{Equation III. 2})$$

Avec :

m : masse du métal (kg)

c : capacité thermique spécifique (kJ/kgK)

T_m : température de fusion (K)

T : température du métal avant la fusion (K)

L : chaleur latente de fusion (kJ/kg)

❖ **Connaissance du moyen de production ($K_{\text{moyen de production}}$) :**

Il s'agit des informations qui sont liées au moyen de production lui-même. Elles dépendent des caractéristiques spécifiques du moyen de production.

Par exemple, dans le cas du système hydraulique utilisé lors de la phase de changement d'outil de coupe d'une machine-outil, l'énergie valorisée du système hydraulique est celle nécessaire pour réaliser le desserrage d'outil de coupe et le maintenir jusqu'à l'arrivée de l'outil de coupe suivant. En connaissant le temps de desserrage et la valeur de la puissance de desserrage de l'outil de coupe, l'énergie valorisée du système hydraulique est calculée en utilisant l'équation suivante :

$$E = P_d.t_d \quad (\text{Equation III. 3})$$

Avec :

E : énergie valorisée du système hydraulique pour réaliser un changement d'outil

P_d : puissance de desserrage

t_{de} : temps de desserrage

En réalité, les besoins en énergie du moyen de production sont beaucoup plus élevés que la valeur de l'énergie valorisée. Comme présenté précédemment, pour un moyen de production, il existe toujours une part d'énergie perdue, liée aux actions sans valeur ajoutée au produit, qui reste importante. Elle est représentée sous forme de « perte » comme le montre la Figure III. 2. Prenons par exemple le cas d'une machine-outil, l'énergie consommée quand la machine-outil est mise sous tension ou lorsque certains composants de la machine sont

sollicités (le mouvement rapide des parties afin d'atteindre à sa position de travail par exemple) ainsi que l'énergie consommée pour refroidir la machine ne participent pas à l'ajout de valeur au produit. Dans le cas d'une presse hydraulique présenté précédemment (partie II.1), l'énergie perdue est celle consommée lors de la mise en place de la pièce à fabriquer ou lors de la phase de montée du poinçon.

Etant donné que la part d'énergie perdue reste importante et que la cible idéale nous donne seulement une vision globale de l'efficacité du moyen de production, il est nécessaire de réaliser une analyse plus détaillée afin de proposer des reconception alternatives permettant de réduire la part d'énergie perdue du moyen de production et d'identifier la part d'énergie valorisée de chaque organe.

II.3. Répartition de l'énergie valorisée:

En se basant sur les connaissances du moyen de production, ses différents organes nommés *Organe i* sont identifiés. L'énergie réelle consommée du moyen de production est répartie en différentes E_i correspondant à l'énergie réelle consommée par chaque *Organe i*. L'idée de la répartition de l'énergie valorisée est d'identifier les liens entre les organes du moyen de production et les parts d'énergie valorisées correspondantes $E_{valorisée i}$, en considérant que toutes les parts d'énergie qui n'ajoutent pas de valeur ajoutée au produit ont une valeur d'énergie valorisée égale à zéro (Figure III. 4)

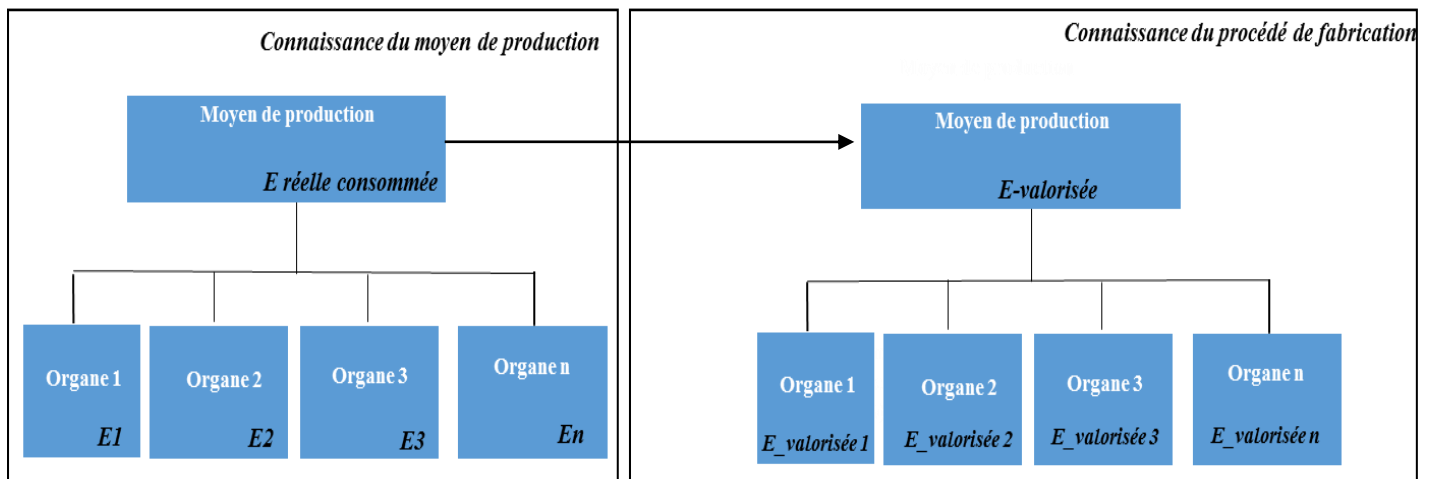


Figure III. 4. Répartition de l'énergie valorisée

Prenons comme exemple la répartition de l'énergie valorisée d'une machine-outil. La connaissance de la machine nous permet d'identifier ses différents organes: la broche, les axes, le système hydraulique, le système de refroidissement, le système de lubrification et l'armoire électrique.

L'énergie valorisée se compose de : l'énergie d'enlèvement de matière, l'énergie du changement de l'outil de coupe et l'énergie de la lubrification. En considérant que toutes les parts d'énergie qui n'ajoutent pas de valeur au produit ont une valeur d'énergie valorisée égale à zéro, les parts d'énergie valorisées sont :

- L'énergie d'enlèvement de matière :
 - o L'énergie de coupe : $E_{valorisée_coupe} = F_c \cdot v_c \cdot t_c$
 - o L'énergie d'avance : $E_{valorisée_axes} = F_a \cdot v_a \cdot t_c$
- L'énergie de changement d'outil de coupe : $E_{valorisée} = P_d \cdot t_d$
- L'énergie de lubrification du procédé de coupe :
$$E_{valorisée} = P_{pompe} \cdot t_c$$
- L'énergie de refroidissement de la machine : $E_{valorisée}=0$
- L'énergie de distribution d'alimentation générale de la machine : $E_{valorisée}=0$

La répartition de l'énergie valorisée de la machine-outil est montrée dans la Figure III.5 :

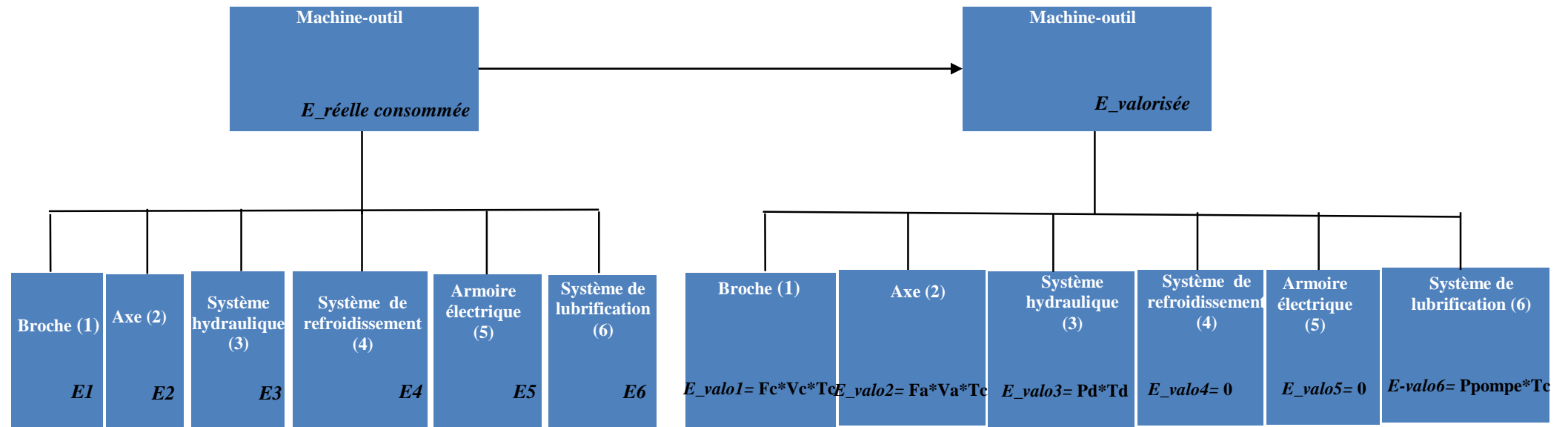


Figure III.5 : Répartition de l'énergie valorisée d'une machine-outil

II.4. Indicateur d'efficacité énergétique :

L'efficacité est un rapport entre le résultat obtenu et les ressources utilisées [ISO 9000 :2005, 2005]. Le terme d'efficacité énergétique utilisé ici sert à déterminer si la part de l'énergie consommée par un organe sert vraiment à ajouter de la valeur au produit final.

Afin d'évaluer l'efficacité énergétique de chaque organe du moyen de production, un indicateur d'efficacité énergétique est proposé. Il est défini comme un rapport entre la part de l'énergie valorisée et l'énergie totale consommée :

$$I_i = \frac{E_{\text{valorisée } i}}{E_{\text{consommée } i}} \quad (\text{Equation III. 4})$$

I_i : indicateur d'efficacité énergétique de l'organe i

$E_{\text{valorisée } i}$: énergie valorisée de l'organe i

$E_{\text{consommée } i}$: énergie totale consommée par l'organe i

En se basant sur la répartition de l'énergie valorisée, nous disposons de toutes les informations sur la valeur de l'énergie valorisée des différents organes du moyen de production.

Pour identifier la valeur de l'énergie totale consommée par chaque organe, l'une des méthodes la plus appropriée est de la mesurer directement sur le moyen de production, dans le cas de la reconception d'un moyen de production existant. Dans le cas de la conception d'un nouveau moyen de production, la valeur de l'énergie totale consommée par un organe est estimée ou prédite en se basant sur le ou les modèles physiques associés aux différents organes du moyen de production. La méthode de mesure de la consommation énergétique d'un moyen de production et de ses différents organes est présentée dans les paragraphes suivants :

❖ Méthode de mesure de la consommation énergétique :

Tout d'abord, le périmètre d'analyse du système de production doit être identifié. Cette étape nous permet d'identifier les flux d'énergie d'entrée et de sortie à analyser sur le moyen de production.

Un exemple d'appareil utilisé pour la mesure de la consommation énergétique d'une machine-outil est représenté dans la Figure III.6:

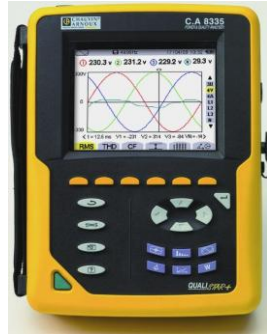


Figure III.6 : Appareil de mesure énergétique

Le principe de cet appareil est de mesurer les valeurs de tension et de courant à l'entrée de la machine-outil ou de ses composants. Cet appareil de mesure peut enregistrer automatiquement la consommation d'énergie (la valeur et également le profil de la puissance consommée) pendant tout le temps de travail de la machine-outil.

Pour cet appareil de mesure, les câbles et les pinces crocodiles sont utilisés pour la mesure de tension et des pinces ampérométriques pour la mesure d'intensité. Les câbles et les pinces, de différentes couleurs, sont branchés sur les trois phases de la machine, au niveau des fusibles d'entrée de la machine-outil. La puissance consommée par la machine-outil, qui est fonction de la tension et de l'intensité, va être ainsi mesurée.

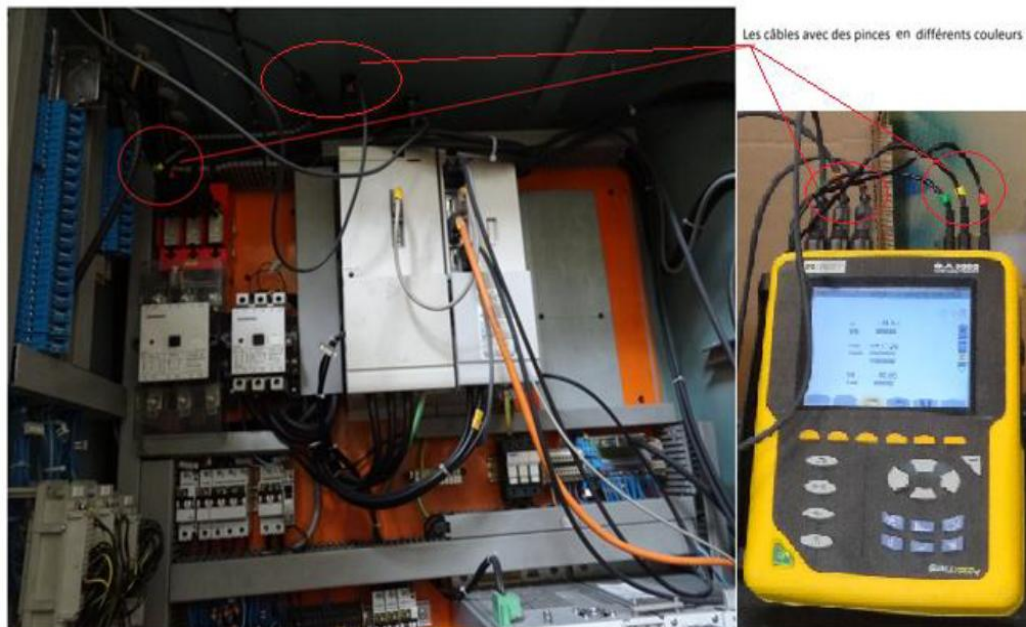


Figure III.7 : Exemple d'une expérimentation de mesure de l'énergie consommée par une machine-outil

L'indicateur I montre le pourcentage de l'énergie consommé par un élément qui sert à ajouter de la valeur au produit. Par exemple, si la valeur de l'indicateur d'un organe i est égale

à 0.6, c'est-à-dire que 60% de l'énergie consommée par cet organe sert à ajouter de la valeur au produit.

Selon (Equation III. 4), la valeur de l'indicateur est comprise entre 0 et 1. Plus la valeur de l'indicateur I_i est proche de 0, plus l'efficacité énergétique de l'organe i est faible, plus elle est proche de 1, plus l'efficacité énergétique est élevée.

Du point de vue de l'amélioration de l'efficacité énergétique, les organes ayant un indicateur I_i faible doivent être repensés de manière à tendre vers un indicateur proche de 1.

II.5. Le gain énergétique potentiel :

Dans un contexte d'amélioration de l'efficacité énergétique, nous définissons les « hot spots énergétiques » du moyen de production comme les organes qui ont une valeur de l'indicateur d'efficacité énergétique faible et qui contribuent majoritairement à la consommation énergétique du moyen de production. Pour les identifier, nous proposons de définir un gain énergétique potentiel.

Le gain énergétique potentiel permet d'identifier le pourcentage d'énergie à gagner théoriquement pour chaque organe. Du point de vue de l'amélioration de l'efficacité énergétique, plus le gain énergétique potentiel d'un organe est élevé, plus la possibilité d'économie énergétique est élevée.

En prenant en compte l'indicateur d'efficacité énergétique et la contribution énergétique de chaque élément à la consommation énergétique totale du moyen de production, le gain énergétique potentiel est calculé de la façon suivante :

$$G_i = (1 - I_i). A_i \quad \text{(Equation III. 5)}$$

Avec :

G_i : gain énergétique potentiel de l'organe i

I_i : indicateur d'efficacité énergétique de l'organe i

A_i : assiette de contribution énergétique de l'organe i à la consommation énergétique totale du moyen de production. Elle est calculée en utilisant l'équation :

$$A_i = \frac{E_{\text{Consommée } i}}{E_{\text{Consommée totale}}} \quad \text{(Equation III. 6)}$$

$E_{\text{Consommée } i}$: énergie consommée totale de l'organe i

$E_{\text{Consommée totale}}$: énergie consommée totale du moyen de production

III. Analyse du moyen de production :

L'objectif de l'étape d'analyse est d'obtenir la cartographie de la consommation énergétique du moyen de production avec les gains énergétiques potentiels des différents organes. L'objectif est de décomposer le moyen de production de manière à diagnostiquer les éléments à analyser et à reconcevoir afin d'améliorer l'efficacité énergétique totale.

Un moyen de production peut se décomposer en différents organes avec différents niveaux de décomposition. La décomposition d'un moyen de production peut être réalisée plus ou moins finement. Elle nous donne une cartographie de la consommation énergétique du moyen de production. Plus la décomposition est fine, plus la cartographie est précise. Par contre, une décomposition fine demande beaucoup d'informations et de connaissances relatives au moyen de production. Cela nous amène à nous poser la question de la granulométrie d'analyse. L'objectif est d'obtenir une granulométrie avec un niveau de détail suffisant pour l'analyse, afin d'obtenir une cartographie de consommation suffisamment précise avec le minimum d'informations nécessaires. Pour ce faire, nous proposons de baser la décision de décomposition sur un critère.

III.1. Critère de décomposition :

Le critère de décomposition proposé a pour l'objectif d'obtenir une décomposition suffisamment fine avec les informations strictement nécessaires.

Le critère de décomposition est basé sur le gain énergétique potentiel des éléments. Plus la valeur du gain énergétique potentiel d'un élément i est élevée, plus la possibilité d'économie d'énergie est grande. Il est intéressant de le décomposer et de l'analyser. Dans cadre de notre travail, le critère sur lequel la décision de décomposition d'un élément i est prise est : *à un niveau donné n , le gain énergétique potentiel de l'élément i est supérieur à 30% du gain énergétique potentiel moyen au niveau $(n-1)$.*

Un exemple d'illustration de ce critère dans la décomposition d'un moyen de production est représenté (Figure III. 8). Dans la Figure III. 8, le moyen de production avec le gain énergétique potentiel G est considéré comme un élément $E1$ au niveau de décomposition 0. Les connaissances du moyen de production nous permettent d'identifier les éléments au premier niveau de décomposition. Dans ce cas, l'élément $E1$ est décomposé en: $E1.1$, $E1.2...$, $E1.k_1$ (niveau 1). Le critère de décomposition permettant de diagnostiquer quels sont les éléments $E1.i$ ($i=1...k_1$) au niveau 1 est à décomposer est le gain énergétique potentiel $G_{E1.i}$ doit être supérieur à 30% du gain énergétique potentiel moyen :

$$G_{E1.i} \geq 0.3 \times \frac{G}{k_1} \text{ (Critère 1)}$$

Comme dans la Figure III. 8, en appliquant le critère de décomposition ci-dessus (*Critère 1*), les éléments E1.i à décomposer sont : E1.1, E1.2. L'élément E1.1 est décomposé en : E1.1.i (i= 1...k₁₁). L'élément E1.2 est décomposé: E1.2.i (i=1...k₁₂). Le critère de décomposition permettant d'identifier quels sont les éléments E1.1.i (i= 1... k₁₁) à décomposer est :

$$G_{E1.1.i} \geq 0.3 \times \frac{G}{k_1 \times k_{11}} \text{ (Critère 2)}$$

Le critère permettant d'identifier les éléments E1.2.i (i= 1... k₁₂) à décomposer est :

$$G_{E1.2.i} \geq 0.3 \times \frac{G}{k_1 \times k_{12}} \text{ (Critère 3)}$$

En appliquant le *critère 2* et *critère 3*, les éléments à décomposer au niveau 2 sont : E1.1.1 et E1.2.1. Nous obtenons donc la représentation du moyen de production aux 4 premiers niveaux de décomposition comme le montre la Figure III. 8.

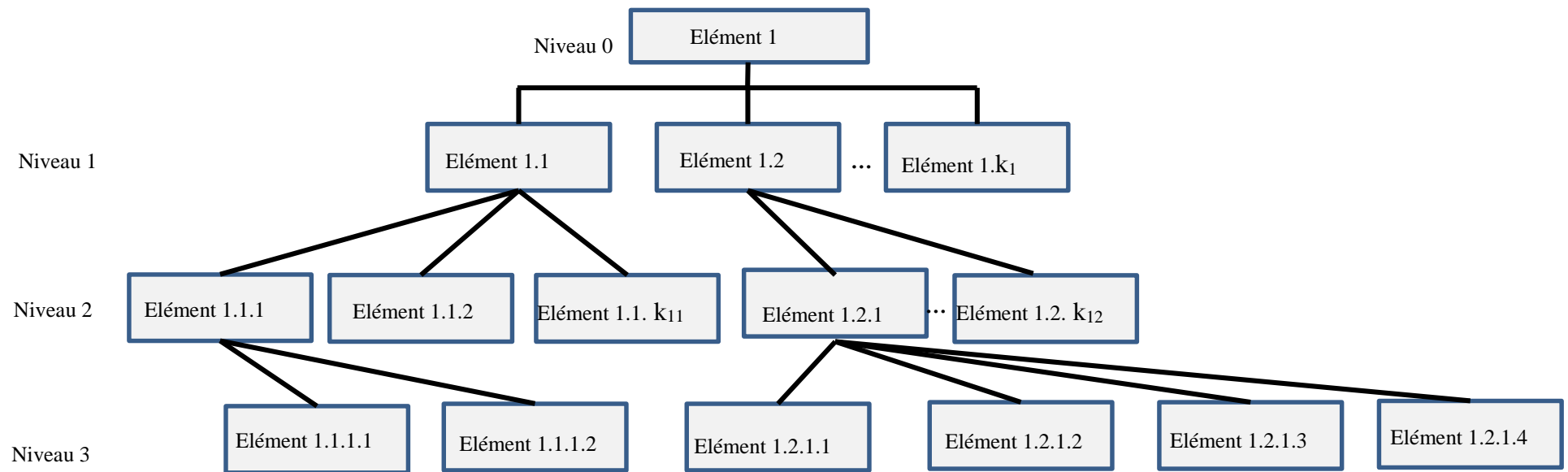


Figure III. 8: Les 4 premiers niveaux de décomposition d'un moyen de production

III.2. Méthode d'analyse du moyen de production :

L'objectif est de proposer une démarche générique permettant d'analyser et d'évaluer le moyen de production afin d'obtenir une cartographie suffisamment détaillée avec les informations strictement nécessaires. La méthode d'analyse du moyen de production est représentée dans la Figure III. 9:

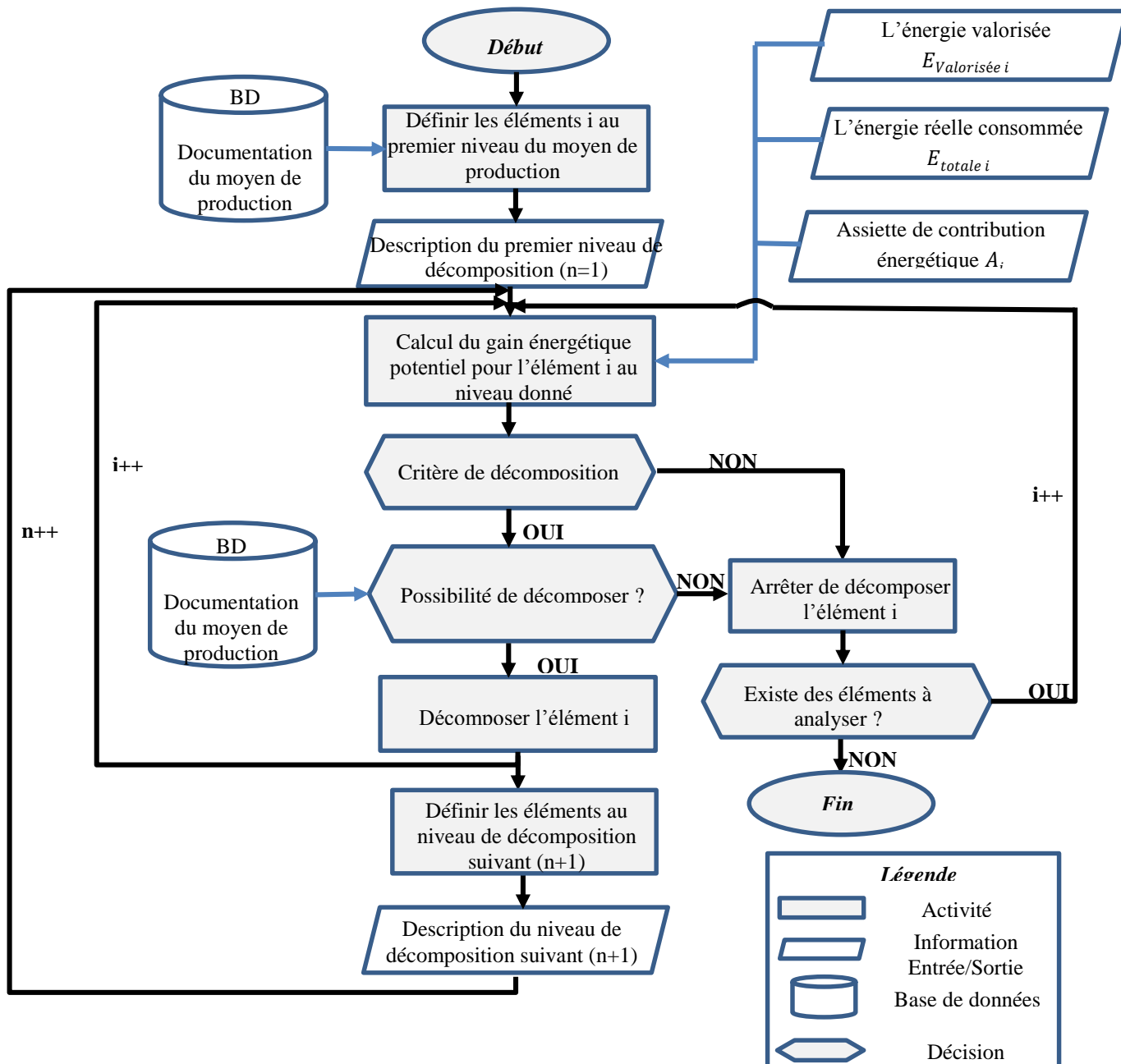


Figure III. 9: Méthode d'analyse du moyen de production

En se basant sur la documentation du moyen de production, la description structurée de la machine permet de définir les éléments i au premier niveau de décomposition ($n=1$). Ces

éléments i sont ensuite évalués de manière à identifier, pour ce niveau, quels sont les éléments i à décomposer plus finement. Pour ce faire, à ce niveau ($n=1$), le gain énergétique potentiel qui servira à la prise de décision de décomposition de l'élément i est calculé. Un élément i est à décomposer plus finement si, pour sa valeur du gain énergétique potentiel, le critère de décomposition (présenté dans la partie III.1) est satisfait et s'il existe une possibilité de décomposer cet élément ou non, en fonction des connaissances du moyen de production. Dans le cas où le critère de décomposition est satisfait et les connaissances du moyen de production montrent qu'il existe une possibilité de décomposer l'élément i , la décomposition plus fine de cet élément i est réalisée. Si non, il faut prendre la décision d'arrêter la décomposition de cet élément i . Par exemple, dans le cas du moteur d'un moyen de production, si le critère de décomposition est satisfait pour ce moteur mais les connaissances du moyen de production nous indiquent que le moteur est indécomposable, nous devons prendre la décision d'arrêter de décomposer ce moteur.

Une fois que l'évaluation des éléments i au niveau $n=1$ est terminée, les éléments à décomposer sont identifiés et nous obtenons ainsi la description du moyen de production aux deux premiers niveaux de décomposition.

En continuant d'analyser et d'évaluer le moyen de production tout en appliquant le principe décrit ci-dessus, nous obtenons à la fin une cartographie complète du moyen de production avec les informations strictement nécessaires.

IV. Exemple :

Dans cette partie, un cas d'étude est réalisé afin d'illustrer l'utilisation de la méthode d'analyse énergétique présentée précédemment. Le cas d'étude concerne un centre d'usinage.

IV.1. Description du centre d'usinage :

Il s'agit d'un centre d'usinage 4 axes qui est constitué :

- D'un bâti de 3 axes X, Y, Z
- D'une électro-broche
- D'un axe rotatif A
- D'un magasin d'outils
- D'une commande numérique
- D'un système de réfrigération
- D'un système hydraulique

- D'un centre d'arrosage
- D'un convoyeur à copeau

IV.2. Opération de coupe :

La machine-outil est utilisée pour usiner une pièce en aluminium. Les paramètres de coupe sont présentés dans le tableau suivant :

<i>Paramètres des données</i>	<i>Valeur</i>
Puissance de coupe moyenne/opération	4.2 kW
Temps de coupe moyen/opération	7.2 secondes
Nombre d'opération	10
Temps total du cycle d'usinage	280 secondes
Nombre de changements d'outils	10
Vitesse de coupe	1507 m/mn
Vitesse d'avance	2250 mm/mn

Tableau III.1. Paramètre de coupe

IV.3. Analyse énergétique de la machine :

Dans cette partie nous appliquons la méthode d'analyse énergétique proposée pour déterminer la cartographie énergétique de la machine avec les informations concernant le gain énergétique potentiel de chaque organe.

IV.3.1. L'énergie réelle consommée par les organes de la machine-outil :

L'énergie réelle consommée par la machine est mesurée directement sur la machine. Le résultat de la mesure de l'énergie consommée par la machine et celle consommée par ses différents organes est montré dans le Tableau III. 2:

Organe	<i>Broche (1)</i>	<i>Axes (2)</i>	<i>Groupe hydraulique (3)</i>	<i>Centrale d'arrosage (4)</i>	<i>Armoire électrique (5)</i>	<i>Système de refroidissement (6)</i>	<i>Air comprimé (7)</i>	<i>Convoyeur à copeau (8)</i>
Valeur de l'énergie (Wh)	190	60	40	350	50	260	225	40

Tableau III. 2 L'énergie réelle consommée par les différents organes de la machine-outil

L'énergie réelle consommée par la machine-outil est donc :

$$E_{réelle\ consommée\ machine} = \sum_{i=1}^8 E_i = 1215\ Wh$$

IV.3.2. Identification de l'énergie valorisée:

Pour une machine-outil, l'énergie valorisée permettant d'ajouter de la valeur au produit est liée aux actions suivantes :

- Enlèvement de matière (I)
- Changements des outils de coupe (II)
- Refroidissement du procédé de coupe (III)

L'énergie valorisée est donc la somme des parts d'énergie valorisée permettant de réaliser les actions indispensables ci-dessus :

$$E_{valorisée} = E_I + E_{II} + E_{III}$$

❖ L'énergie valorisée E_I pour réaliser un enlèvement de matière :

Pour réaliser un enlèvement de matière, la machine consomme de l'énergie pour réaliser les mouvements de l'outil et les mouvements de la pièce usinée. L'énergie valorisée pour l'enlèvement de matière se compose donc de :

- L'énergie valorisée pour réaliser les mouvements liés à l'outil : Cela correspond à l'énergie consommée par la broche quand la machine produit des copeaux. Elle est calculée en utilisant l'équation suivante :

$$E_{valorisée_coupe} = P_c \times t_c = 4.2 * 1000 * 7.2 * \frac{10}{3600} = 84\ Wh$$

- L'énergie valorisée pour réaliser les mouvements de la pièce à usiner : Cela correspond à l'énergie consommée par les axes quand la machine produit des copeaux. Elle est calculée en utilisant l'équation suivante :

$$E_{valorisée_Axe} = P_a \times t_c = F_a \times v_a \times t_c$$

$$F_a = 0.3 F_c = 50N$$

$$E_{valorisée_Axe} = 50 * \frac{2250}{1000 * 60} * \frac{7.2 * 10}{3600} = 0.04\ Wh$$

❖ L'énergie valorisée E_{II} pour réaliser les changements d'outil de coupe :

Pour une machine-outil, le système hydraulique sert à manipuler les changements d'outil et la pièce à usiner. Pour simplifier le calcul, nous prenons comme hypothèse dans notre cas d'étude que le système hydraulique participe seulement aux changements d'outil.

Dans la production réelle, le système hydraulique tourne tout temps lors du démarrage de la machine-outil mais il n'ajoute de la valeur que lors du changement d'outil. La valeur de l'énergie valorisée E_{II} est la part d'énergie consommée pour réaliser le desserrage de l'outil et de le maintenir jusqu'à l'arrivée de l'outil suivant. Elle est calculée en utilisant l'équation suivante :

$$E_{II} = N \times P_d \times t_d$$

Avec :

N : nombre de changements d'outil demandés pour la fabrication

$t_{desserrage}$: temps de desserrage de l'outil

$P_{desserrage}$: puissance de desserrage de l'outil

Pour faciliter le calcul, nous prenons comme hypothèse que dans la production réelle de cette machine-outil, la puissance réelle consommée du système hydraulique est égale à la puissance de desserrage d'outil de coupe. L'énergie consommée réelle du système hydraulique est donc :

$$E_3 = 40 \text{ Wh}$$

La valeur de l'énergie valorisée E_{II} est donc calculée :

$$E_{II} = \frac{E_3 \times N \times t_{desserrage}}{t_{cycle \text{ complet}}} = \frac{40 \times 10 \times 3.5}{280} = 5 \text{ Wh}$$

❖ **L'énergie valorisée E_{III} pour refroidir le procédé de coupe** : Dans la production réelle, la centrale d'arrosage qui sert à refroidir le procédé de coupe tourne tout temps mais elle n'ajoute de la valeur que lorsque la machine produit des copeaux. La valeur de E_{III} est :

$$E_{III} = P_{Pompe \text{ de lubrification}} \times t_{coupe}$$

Nous avons l'énergie E_4 réelle consommée par la centrale d'arrosage :

$$E_4 = 350 \text{ Wh}$$

L'énergie valorisée E_{III} est donc calculée :

$$E_{III} = \frac{E_4 \times t_{coupe}}{t_{cycle \text{ complet}}} = \frac{350 \times 7.2 \times 10}{280} = 90 \text{ Wh}$$

La valeur de l'énergie valorisée est donc :

$$E_{valorisée} = E_I + E_{II} + E_{III} = 84.04 + 5 + 90 = 179.04 \text{ Wh}$$

Le gain énergétique de la machine est donc :

$$G_{machine} = 1 - \frac{E_{valorisée}}{E_{réelle \text{ consommée machine}}} = 1 - \frac{179.04}{1215} = 85.3 \%$$

Nous pouvons constater que le gain énergétique potentiel de la machine est très élevé, il est donc intéressant de l'analyser plus en détail.

IV.3.3. Répartition d'énergie valorisée:

La répartition de l'énergie valorisée de la machine-outil est représentée dans la Figure III.10 ci-dessous.

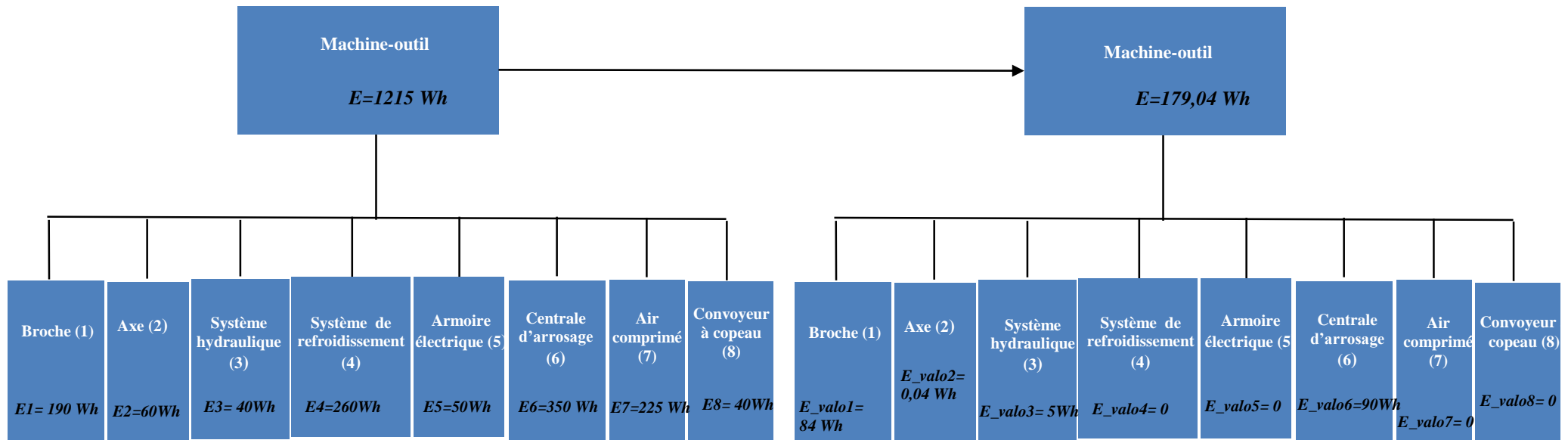


Figure III.10 : Répartition de la cible idéale de la machine-outi

IV.3.4. Calcul du gain énergétique G_i des différents éléments de la machine :

Pour chaque élément i ($i= 1...8$) de la machine, en utilisant la valeur de l'énergie valorisée (voir Figure III.10) et la valeur de l'énergie réelle consommée (Tableau III. 2), le gain énergétique G_i est calculé :

❖ La broche (1) :

Le gain énergétique de la broche (broche et broche chicane)

$$G_1 = (1 - I_1)A_1 = \left(1 - \frac{84}{305}\right) * \frac{305}{1215} = 18.2\%$$

❖ Les axes(2) :

Le gain énergétique des axes :

$$G_2 = (1 - I_2)A_2 = \left(1 - \frac{0.04}{60}\right) * \frac{60}{1215} = 4.9\%$$

❖ Le système hydraulique(3) :

Le gain énergétique du système hydraulique :

$$G_3 = (1 - I_3)A_3 = \left(1 - \frac{5}{40}\right) * \frac{40}{1215} = 2.9\%$$

❖ La centrale d'arrosage(4) :

Le gain énergétique de la centrale d'arrosage :

$$G_4 = (1 - I_4)A_4 = \left(1 - \frac{90}{350}\right) * \frac{350}{1215} = 21.4\%$$

Comme indiqué précédemment dans la partie IV.3.3, l'énergie valorisée de l'air comprimé, l'armoire électrique, le système de refroidissement de la machine et le convoyeur à copeau est égale à zéro. Ses indicateurs d'efficacité énergétique sont donc nuls.

❖ L'armoire électrique(5) :

$$G_5 = A_5 = \frac{50}{1215} = 4.1\%$$

❖ Le système de refroidissement(6) :

Le gain énergétique du système de refroidissement :

$$G_6 = A_6 = \frac{260}{1215} = 21.4\%$$

❖ L'air comprimé(7) :

Le gain énergétique de l'air comprimé :

$$G_7 = A_7 = \frac{E_{\text{réelle air comprimé général}} - E_{\text{réelle broche chicane}}}{E_{\text{réelle consommée machine}}} = \frac{225 - 115}{1215} = 9.05\%$$

❖ Convoyeur à copeau (8) :

Le gain énergétique du convoyeur à copeau :

$$G_8 = A_8 = \frac{40}{1215} = 3.3\%$$

IV.3.5. Analyse énergétique de la machine :

L'objectif est de décomposer la machine-outil de manière à diagnostiquer les éléments à analyser pour améliorer l'efficacité énergétique de la machine.

La description de la machine nous permet d'identifier les éléments de la machine au premier niveau de décomposition structurelle. Le premier niveau de décomposition avec le gain énergétique potentiel de chaque élément est représenté dans la figure ci-dessous :

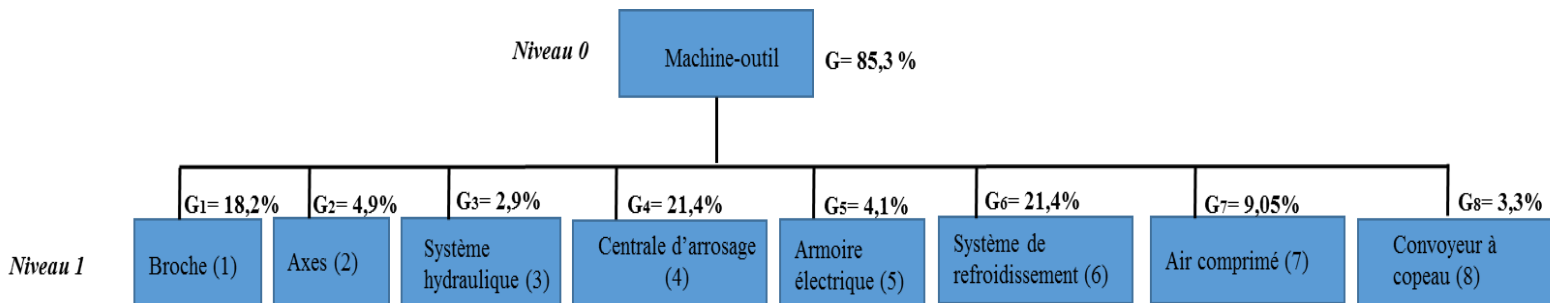


Figure III.11 : Premier niveau de décomposition

Pour avoir une cartographie de consommation plus détaillée, le critère de décomposition est utilisé afin de diagnostiquer quels sont les éléments i ($i=1 \dots 8$) à décomposer ensuite.

Le critère de décomposition : $G_i \geq 0.3 \times \frac{G}{8} = 0.032 = 3.2\%$ ($i=1 \dots 8$)

En appliquant ce critère de décomposition sur chaque élément i , nous avons :

- Pour la broche : $G_1 = 18.2\% > 3.2\%$ (satisfait)
- Pour les axes : $G_2 = 4.9\% > 3.2\%$ (satisfait)
- Pour le groupe hydraulique : $G_3 = 2.9\% < 3.2\%$ (insatisfait)
- Pour la centrale d'arrosage : $G_4 = 21.4\% > 3.2\%$ (satisfait)
- Pour l'armoire électrique : $G_5 = 4.1\% > 3.2\%$ (satisfait)
- Pour le système de refroidissement : $G_6 = 21.4\% > 3.2\%$ (satisfait)
- Pour l'air comprimé : $G_7 = 9.05\% > 3.2\%$ (satisfait)
- Pour le convoyeur à copeau : $G_8 = 3.3\% > 3.2\%$ (satisfait)

En se basant sur le critère de décomposition et la documentation de la machine-outil, nous pouvons constater que les organes à décomposer au deuxième niveau de décomposition de la machine sont :

- **La broche** : elle se compose d'un moteur électrique et des chicanes de la broche

Les connaissances de la machine-outil indiquent que l'étanchéité des éléments de guidage en rotation de la broche est assurée par une chicane (broche chicane). La chicane n'apporte donc pas de valeur ajoutée au produit. La valeur d'énergie valorisée des chicanes de la broche égale donc à zéro. Son gain énergétique potentiel est donc :

$$G_{1.1} = A_{1.1} = \frac{115}{115+190} \times 0.182 = 6.9\%$$

Le gain énergétique potentiel du moteur de la broche est donc :

$$G_{1.2} = G_1 - G_{1.1} = 18.2 - 6.9 = 11.3\%$$

- **Les axes** : ils se composent de : l'axe X, l'axe Y et l'axe Z

Dans notre cas d'étude, l'opération de coupe est un surfacage, nous considérons donc l'axe qui est le plus sollicité et qui consomme majoritairement d'énergie entre les axes est donc l'axe X. Son gain énergétique potentiel est égal à celui des axes :

$$G_{2.1} = G_2 = 4.9 \%$$

- **La centrale d'arrosage** : elle se compose d'une pompe alimentation machine et d'un groupe froid.

Les connaissances de la machine-outil indiquent que le groupe froid utilisé dans ce cas sert seulement à refroidir la centrale d'arrosage elle-même. Il n'apporte donc pas de valeur ajoutée au produit. Sa valeur d'énergie valorisée est égale à zéro. Le gain énergétique potentiel du groupe froid est donc calculé :

$$G_{4.1} = A_{4.1} = \frac{150}{350} \times 0.214 = 9.2\%$$

Le gain énergétique potentiel de la pompe de la centrale d'arrosage est donc :

$$G_{4.2} = G_4 - G_{4.1} = 21.4 - 9.2 = 12.2 \%$$

- **L'air comprimé** : les connaissances de la machine-outil indiquent que cet organe est indécomposable. La décomposition de ces organes est donc finie.
- **L'armoire électrique** : les connaissances de la machine-outil indiquent que cet organe est indécomposable. La décomposition de ces organes est donc finie.
- **Le système de refroidissement** : il se compose d'une pompe, d'un compresseur et d'un ventilateur.

La valeur d'énergie valorisée du système de refroidissement est égale à zéro. Les éléments en sous du système de refroidissement (pompe, compresseur, ventilateur) ont toute la valeur d'énergie valorisée nul. Le gain énergétique potentiel pour ces éléments est donc égal à l'assiette de consommation énergétique de chaque élément.

- Le gain énergétique de la pompe :

$$G_{(2)6.1} = A_{(2)6.1} = 9.9 \%$$

- Le gain énergétique du compresseur :

$$G_{(2)6.2} = A_{(2)6.2} = 9.9\%$$

- Le gain énergétique du ventilateur :

$$G_{(2)6.3} = A_{(2)6.3} = 1.6 \%$$

- **L'air comprimé** : les connaissances de la machine-outil indiquent que cet organe est indécomposable. La décomposition de ces organes est donc finie.
- **L'armoire électrique** : les connaissances de la machine-outil indiquent que cet organe est indécomposable. La décomposition de ces organes est donc finie.
- **Le système de refroidissement** : il se compose d'une pompe, d'un compresseur et d'un ventilateur.

La valeur de l'énergie valorisée du système de refroidissement est égale à zéro. Les éléments en dessous du système de refroidissement (pompe, compresseur, ventilateur) ont toute une valeur d'énergie valorisée nulle. Le gain énergétique potentiel pour ces éléments est donc égal à l'assiette de consommation énergétique de chaque élément.

- Le gain énergétique de la pompe :

$$G_{6.1} = A_{6.1} = 9.9 \%$$

- Le gain énergétique du compresseur :

$$G_{6.2} = A_{6.2} = 9.9\%$$

- Le gain énergétique du ventilateur :

$$G_{6.3} = A_{6.3} = 1.6 \%$$

- **Le convoyeur à copeau** : les connaissances de la machine-outil indiquent que cet organe est indécomposable. La décomposition de ces organes est donc finie.

Nous obtenons ci-dessous la cartographie de la machine-outil au deuxième niveau de décomposition :

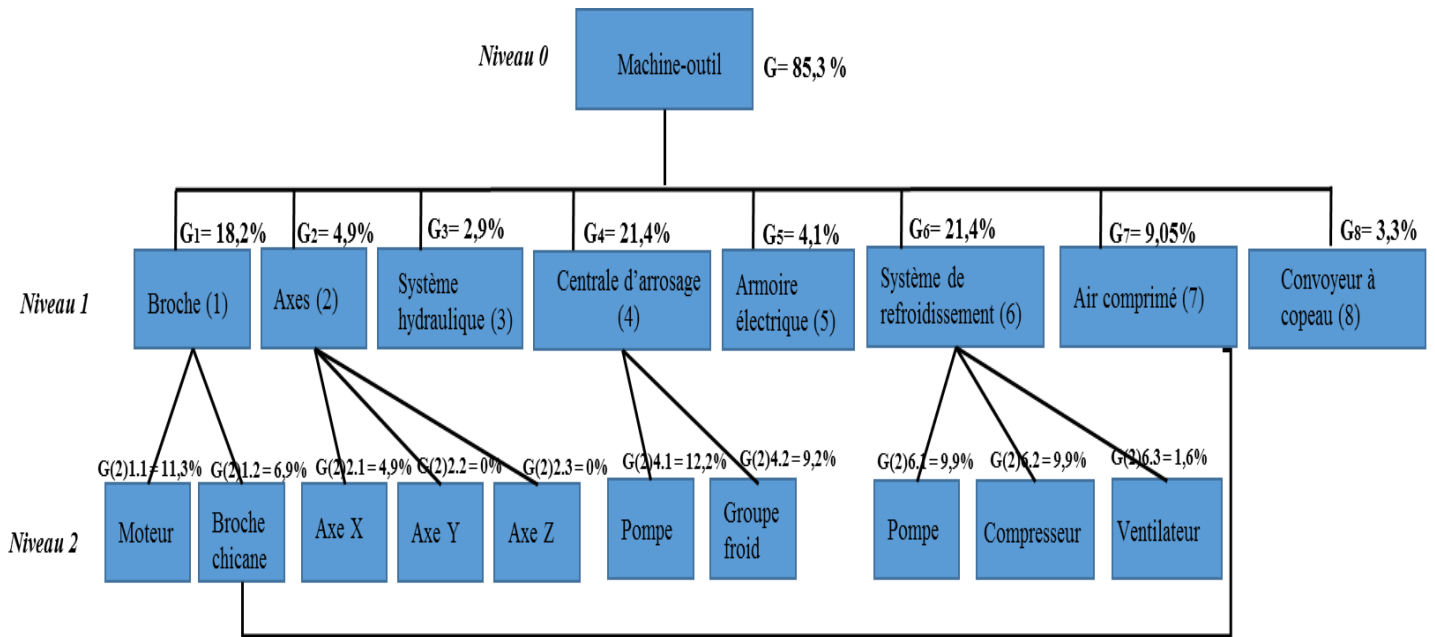


Figure III.12 : Les deux premiers niveaux de décomposition

Les connaissances de la machine-outil nous permettent de prendre la décision d'arrêter de le décomposer plus finement car les éléments au deuxième niveau de décomposition sont indécomposables. La cartographie complète de la machine est donc identique à celle montrée dans la Figure III.12.

V. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté un modèle de consommation énergétique permettant de répartir l'énergie consommée par un élément du moyen de production de manière à identifier la part d'énergie valorisée consommée qui sert à créer la valeur ajoutée au produit ($E_{\text{valorisée}}$). Un indicateur d'efficacité énergétique permettant d'évaluer l'efficacité énergétique du moyen de production et de ses organes est également proposé. Nous avons présenté une méthode d'analyse qui nous permet d'obtenir la cartographie de consommation énergétique. A la fin de ce chapitre, un exemple est réalisé pour illustrer l'utilisation de la méthode d'analyse proposée.

A partir des informations concernant la cartographie de consommation énergétique et les gains potentiels énergétiques des organes, nous pouvons proposer des scénarios de reconception. Une méthode de proposition des scénarios de reconception est présentée dans le chapitre suivant.

CHAPITRE IV : Méthode de proposition des scénarios de reconception

SOMMAIRE

CHAPITRE IV : Méthode de proposition des scénarios de reconception	70
---	-----------

I. Analyse fonctionnelle :.....	72
--	-----------

I.1. Fonction	72
---------------------	----

I.2. Solution technique	72
-------------------------------	----

I.3. Association Fonction-Technologie :.....	74
--	----

II. Matrice de l'interaction énergétique :.....	75
--	-----------

III. Méthode de proposition des scénarios de reconception :	80
--	-----------

III.1. Les grandes pistes d'amélioration d'efficacité énergétique :.....	80
--	----

III.2. Méthode de proposition des scénarios de reconception :.....	81
--	----

III.2.1. Critère de choix de pistes d'amélioration :.....	81
---	----

III.2.2. Démarche de proposition des actions de reconception.....	85
---	----

IV. Exemple :.....	86
---------------------------	-----------

IV.1. Analyse fonctionnelle :	86
-------------------------------------	----

IV.2. Modèle de l'interaction énergétique :.....	88
--	----

IV.3. Proposition des scénarios des scénarios de reconception :.....	91
--	----

• Pompe d'arrosage :.....	91
---------------------------	----

• Air comprimé :	92
------------------------	----

• Système de refroidissement :	92
--------------------------------------	----

V. Conclusion :	93
------------------------------	-----------

Résumé du chapitre

Le chapitre précédent nous a permis d'identifier la cartographie énergétique du moyen de production avec les informations concernant les gains énergétiques potentiels des différents organes. Ces informations nous permettent ensuite de proposer les scénarios de reconception.

L'objectif de ce chapitre est de présenter une méthode de proposition des scénarios de reconception permettant de réduire la consommation énergétique du moyen de production.

La première partie du chapitre porte sur une analyse fonctionnelle du moyen de production mettant en avant les liens entre les organes et les fonctions correspondantes.

En se basant sur l'analyse fonctionnelle et l'analyse des flux d'énergie d'entrée et de sortie des organes, nous pouvons ensuite identifier les interactions entre les différents organes, présentées dans la deuxième partie de ce chapitre.

A la fin de ce chapitre, une démarche générale conduisant à proposer les scénarios de reconception du moyen de production et son application sur un cas d'étude sont présentées.

I. Analyse fonctionnelle :

« L'analyse fonctionnelle est une démarche qui consiste à recenser, caractériser, ordonner, hiérarchiser des fonctions » [NF X 50-151, 1991]. Elle s'applique à la conception ou la reconception de « système » [Delafollie, 1991]. Le terme « système » est utilisé au sens large pour désigner un produit, un projet, un procédé ou une organisation. Dans cadre de notre étude, le « système » ici est un moyen de production.

L'analyse fonctionnelle permet de décrire comment fonctionne le moyen de production en étudiant comment les organes participent à la réalisation des fonctions. Elle permet donc d'identifier les relations Fonction-Technologie du moyen de production, relations entre les fonctions à accomplir du moyen de production et les technologies associées.

L'analyse fonctionnelle *en phase de conception* est utilisée comme un outil d'aide à la recherche et validation des solutions techniques dans une logique de réponse à la question : comment réaliser cette fonction technique ? *En phase de reconception*, elle est considérée comme un outil de description et de mise en correspondance des solutions techniques avec les fonctions techniques qu'elles réalisent dans une logique de réponse à la question : quelle fonction assure cette solution technique ?

I.1. Fonction :

La notion de fonction est définie comme : « l'action d'un produit ou de l'un de ses constituants » [EN 1325-1, 1996]. Deux types de fonctions sont distingués :

- *Les fonctions de service* : « Les actions demandées à un produit ou réalisées par lui afin de répondre à un élément du besoin d'un utilisateur ». Chaque fonction de service est ensuite traduite par les fonctions techniques.
- *Les fonctions techniques* : « Les actions d'un constituant ou actions intervenant entre les constituants du produit afin d'assurer les fonctions de service ». Une fonction technique répond à un besoin technique du concepteur en définissant une solution d'ensemble. Pour répondre à chaque fonction technique, les solutions techniques adaptées aux contraintes sont proposées.

I.2. Solution technique :

La solution technique est proposée par le concepteur pour réaliser une ou plusieurs fonctions au regard de toutes les exigences et contraintes à respecter. Il peut exister plusieurs solutions techniques pour répondre à la même fonction.

Une solution technique est le résultat du choix d'un principe technique, d'une organisation structurelle (forme/volume) et de matériaux. Le choix de solution technique se fait en fonction de différentes contraintes que doit respecter l'objet (coût, qualité...). Chaque solution technique peut se traduire sous forme d'une technologie, d'un composant ou de l'ensemble des composants. Le produit est obtenu par l'assemblage de ces composants. Alors, il est possible de savoir quels composants participent à quelles fonctions et vice versa.

Comme le montre la Figure IV.1, dans la phase de conception d'un produit, les fonctions de service du produit sont identifiées à partir des exigences techniques découlant des besoins clients. Les fonctions de service peuvent ensuite se décomposer en différentes sous-fonctions de service qui elles même se décomposent en fonctions techniques et sous-fonctions techniques. Les fonctions techniques sont réalisées par des solutions techniques.

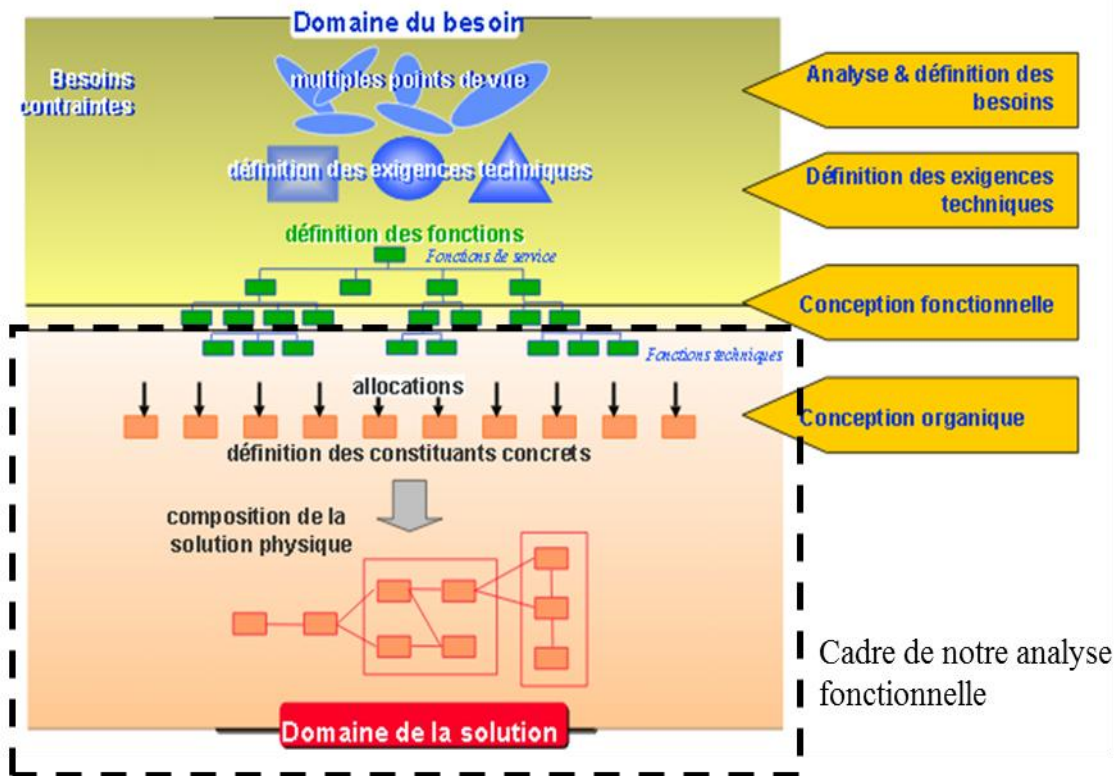


Figure IV.1 : Décomposition fonctionnelle et allocation aux organes des fonctions [PSA,1999]

En gardant l'idée d'ajouter une contrainte supplémentaire, l'efficacité énergétique, nous nous intéressons à la modification du moyen de production en choisissant de nouvelles alternatives de conception afin d'améliorer l'efficacité énergétique. Le cadre de notre analyse fonctionnelle se situe au niveau des fonctions techniques, des solutions techniques et de l'associations entre elles. L'idée est de comprendre le rôle de chaque organe dans l'accomplissement de la fonction principale du moyen de production.

I.3. Association Fonction-Technologie :

Les fonctions du moyen de production sont assurées par l'ensemble des organes. Chaque fonction a des exigences à atteindre. L'objectif est de mettre en avant les liens entre les organes et les fonctions correspondantes.

Les relations Fonction-Technologie d'un moyen de production sont représentées sous la forme d'une matrice comme le montre la Figure IV.2 :

<i>Technologie (T_i)</i> <i>Fonction (F_i)</i>	T₁	T₂	T₃	T₄
F₁	X			
F₂		X		
F₃		X		
F₄			X	
F₅				X
F₆				X

Figure IV.2 : Matrice relation Fonction-Technologie

Dans la matrice de relation Fonction-Technologie, les colonnes présentent les technologies T_i (organe ou l'ensemble des organes) utilisées par le moyen de production. Les lignes de la matrice présentent les fonctions F_i à accomplir par le moyen de production. Les croix «X» utilisées représentent les relations Fonction-Technologie. Généralement, une fonction est accomplie par l'utilisation d'une technologie correspondante. Il existe également des cas où une technologie peut être utilisée pour répondre à plusieurs fonctions différentes et inversement.

Pour constituer la matrice relation Fonction-Technologie du moyen de production, les étapes nécessaires sont :

- *La description structurelle du moyen de production* : L'objectif est de lister les technologies utilisées par le moyen de production.
- *La description fonctionnelle du moyen de production* : L'objectif de cette étape est d'identifier les fonctions techniques à accomplir par le moyen de production. La description fonctionnelle du moyen de production n'est pas unique, il est possible d'exprimer les fonctions de différentes manières. Par exemple, les fonctions principales d'une machine-outil sont [Gontarz et al., 2012] :
 - Réaliser l'enlèvement de matière
 - Refroidir le process de fabrication
 - Refroidir la machine
 - Manipuler la pièce à fabriquer
 - Manipuler l'outil de coupe
 - Traiter les déchets

Dans nos travaux, nous nous basons sur la cartographie du moyen de production réalisée préalablement dans la phase d'analyse présentée dans le chapitre précédent du manuscrit pour identifier la liste des technologies dans la matrice relation Fonction-Technologie. En connaissant la liste des technologies de la matrice, nous cherchons des fonctions associées à ces technologies pour remplir la matrice relation Fonction-Technologie.

II. Matrice d'interaction entre les organes:

Un organe permet de transformer ou de transmettre de la matière, de l'énergie ou des informations. Il peut être représenté comme une boîte noire dont les flux d'entrée et de sortie sont : l'énergie, la matière et l'information comme le montre Figure IV.3 ci-dessous :

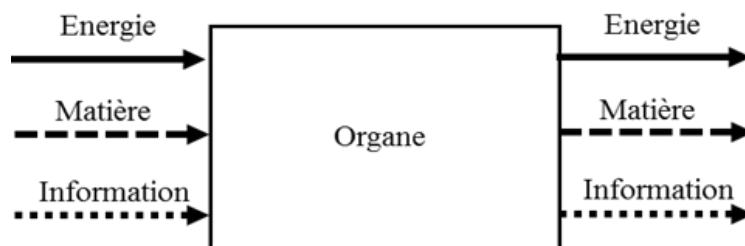


Figure IV.3 : Modèle de présentation d'un organe

Un moyen de production est constitué d'un ensemble d'organes inter-reliés qui interagissent les uns avec les autres pour garantir la fonction principale du moyen de

production. L'interaction entre les organes peut-être exprimée sous différentes formes comme : échange de matière, d'énergie ou d'information.

Dans cadre de nos travaux, nous nous intéressons au flux d'énergie à l'intérieur du moyen de production. L'identification du flux d'énergie d'entrée et de sortie de chaque organe du moyen de production nous permet non seulement de savoir comment l'organe utilise l'énergie pour réaliser une fonction associée mais également de déterminer l'interaction énergétique entre les différents organes du moyen de production.

Par exemple, dans le cas d'un moteur électrique utilisé pour déplacer la table de la machine-outil, le flux d'énergie d'entrée fourni est sous forme électrique, le flux d'énergie de sortie est sous forme mécanique pour déplacer la table et sous forme thermique (chaleur dégagée) comme le montre la Figure IV.4 :

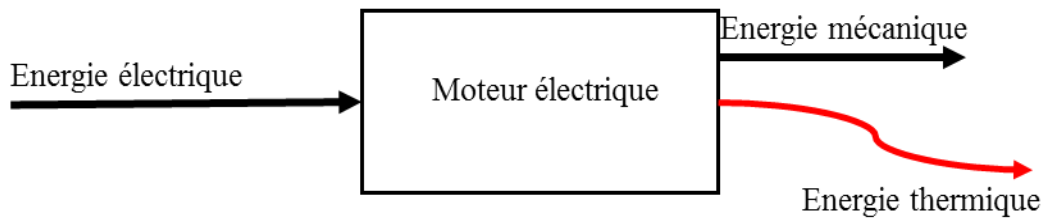


Figure IV.4 : La représentation des flux d'énergie d'entrée et de sortie du moteur

L'énergie de sortie d'un organe peut devenir l'énergie d'entrée d'un autre organe du moyen de production. Cela crée une interaction énergétique entre eux. Par exemple dans le cas d'une machine-outil, il existe une interaction énergétique entre les moteurs (moteur broche et moteur des axes), l'armoire électrique et le système de refroidissement comme illustrée dans la Figure IV.5. En effet, comme expliqué dans les paragraphes précédents, du point de vue énergétique, les moteurs électriques de la machine-outil transforment l'énergie électrique en énergie mécanique pour réaliser le mouvement de l'outil de coupe (moteur broche) et le mouvement de la table (moteur des axes) et une part de l'énergie est perdue sous forme d'énergie thermique (la chaleur). Le système de refroidissement est utilisé pour évacuer l'énergie thermique. L'énergie électrique consommée par le système de refroidissement dépend donc de la valeur de l'énergie thermique à évacuer issue des moteurs électriques et de l'armoire électrique :

$$E_{\text{électrique } 3} = f(E_{\text{thermique } 1}, E_{\text{thermique } 2})$$

Cela crée une interaction énergétique entre l'ensemble des moteurs électriques, de l'armoire électrique et le système de refroidissement. En effet, plus la valeur de l'énergie thermique

$E_{thermique 1}$ et $E_{thermique 2}$ à évacuer est grande, plus l'énergie électrique $E_{électrique 3}$ consommée par le système de refroidissement est grande.

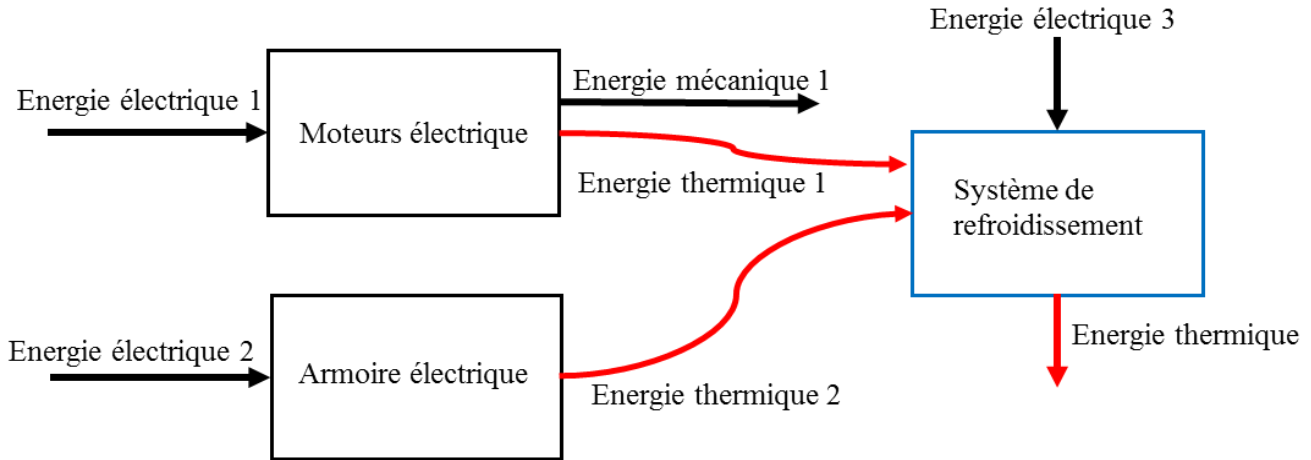


Figure IV.5 : L'interaction énergétique entre les moteurs et le système de refroidissement de la machine-outil

Lorsqu'il existe une interaction énergétique entre les organes, l'énergie consommée par un organe dépend non seulement du choix de la technologie elle-même mais également de la technologie des organes inter-liés énergétiques avec qu'elle. Les actions de reconception proposées sur un organe peuvent avoir des impacts négatifs ou positifs sur les autres organes inter-liés énergétiquement avec cet organe. Les actions de reconception pour réduire la consommation énergétique du moyen de production ne peuvent pas être proposées de façon indépendante. Il est nécessaire de prendre en compte également les interactions énergétiques dans l'amélioration de l'efficacité énergétique du moyen de production.

Les interactions énergétiques entre les organes du moyen de production sont représentées sous forme d'une matrice (Figure IV.6). C'est une matrice carrée $n \times n$ éléments dont les colonnes et les lignes sont les organes du moyen de production.

<i>Organe</i>	<i>Organe</i>	O ₁	O ₂	O ₃	O ₄	O ₅
O ₁	E ₁	$x_{21}E_2$ ↑	$x_{31}E_3$ ↑			
O ₂		E ₂				
O ₃			E ₃			
O ₄				E ₄		
O ₅				$x_{45}E_4$ ↓	E ₅	

← Energie consommée par « organe i » dépend de →

↑ Energie consommée par « organe i » a un impact sur ↓

Figure IV.6 : Matrice de l'interaction énergétique

Dans la matrice de l'interaction énergétique :

- O_i : Organe i
- E_i : Energie consommée par un organe i
- $x_{ij} E_i$ ($0 < x_{ij} < 1$) : Part d'énergie de l'organe i qui caractérise l'interaction énergétique entre organe i et organe j : $x_{ij}E_i = f(E_i)$

Elle a donc un impact sur le choix de l'organe j. Cet impact est exprimé sous forme d'équation suivante :

$$E_j = f(x_{ij}E_i)$$

- Le symbole ↑ : Le sens d'impact positif. C'est-à-dire, plus la valeur de $x_{ij} E_i$ est grande, plus l'énergie consommée par l'organe j est grande. Dans le cas contraire, nous utilisons le symbole ↓ pour montrer le sens d'impact négatif.
- L'interprétation de la matrice de gauche à droite nous permet de répondre à la question : *L'énergie consommée par un organe dépend de quel autre organe ?*
- L'interprétation de la matrice de bas en haut nous permet de répondre à la question : *L'énergie consommée par organe a un impact sur quel organe ?*

Nous prenons ici un exemple sur l'interaction énergétique entre l'ensemble des moteurs de broche, d'axes et le système de refroidissement de la machine-outil pour illustrer la matrice de l'interaction énergétique proposée. Dans la figure IV.6, imaginons que : O_1 est le système de refroidissement, O_2 est le moteur broche, O_3 est le moteur d'axe, O_4 est les chicanes de broche, O_5 est l'air comprimé.

L'énergie totale consommée par le système de refroidissement (E_1) dépend de la chaleur dégagée par le moteur broche ($x_{21}E_2$) et par le moteur d'axe ($x_{31}E_3$) : $E_1 = f(x_{21}E_2, x_{31}E_3)$. Plus la chaleur dégagée est grande, plus l'énergie totale consommée E_1 est grande. Cela justifie le sens d'impact positif \uparrow utilisé. L'énergie consommée par le moteur broche E_2 a évidemment un impact sur la valeur de la chaleur dégagée par le moteur broche $x_{21}E_2$: $x_{21}E_2 = f(E_2)$. C'est dans le même situation pour la chaleur dégagée par le moteur d'axe : $x_{31}E_3 = f(E_3)$.

L'énergie totale consommée (E_5) par l'air comprimé dépend de l'énergie $x_{45}E_4$ consommée par les chicanes de broche : $E_5 = f(x_{45}E_4)$. Plus la valeur $x_{45}E_4$ est grande, plus l'énergie totale consommée E_5 est grande. Cela justifie le sens d'impact positif \uparrow utilisé.

Pour remplir la matrice de l'interaction énergétique ci-dessus, il est nécessaire de répondre donc pour chaque organe les questions suivantes :

- *Comment cet organe utilise énergie pour réaliser une fonction associée ?*
- *Existe-t-il une interaction énergétique entre cet organe et les autres organes ?*
 - De quoi dépend l'énergie consommée par cet organe ?
 - Sur quoi l'énergie consommée par cet organe a un impact ?

Par exemple dans le cas d'une machine-outil, une partie de la matrice de flux d'énergie est présentée dans la Figure IV.7 ci-dessous :

Organe Organe	Moteur Broche (1)	Moteur d'axe (2)	Armoire électrique (3)	Système de refroidissement (4)	...
Broche (1)	190 Wh				
Axes (2)		60 Wh			
Armoire électrique (3)			80Wh		
Système de refroidissement (4)	19 Wh \uparrow	6Wh \uparrow	50Wh \uparrow	225Wh	
.....					

Figure IV.7 : Une partie de la matrice de flux d'énergie de la machine-outil

Dans cet exemple, en mesurant sur les organes de la machine-outil, nous obtenons l'énergie consommée réelle par le moteur de la broche : $E_1=190$ Wh, par moteur d'axe : $E_2=60$ Wh, par l'armoire électrique : $E_3= 80$ Wh et par le système de refroidissement : $E_4=2250$ Wh. En considérant que le rendement du moteur de la broche et du moteur d'axe est de 90%, nous calculons donc la valeur d'énergie dégagée sous forme de la chaleur : 19 Wh pour la broche et 6 Wh pour le moteur d'axe. La chaleur dégagée par l'armoire électrique est de 50Wh. Comme la fonction du système de refroidissement est d'évacuer la chaleur dégagée par les différents organes, les interactions énergétiques entre le système de refroidissement et l'ensemble du moteur broche, le moteur d'axe et l'armoire électrique sont identifiées (marquées en bleu dans la Figure IV.7). Plus la valeur d'énergie dégagée est grande, plus l'énergie consommée par le système de refroidissement pour évacuer la chaleur est grande. Dans ce cas, pour évacuer 75 Wh de chaleur, le système de refroidissement consomme 250Wh. Toute réduction de la chaleur à évacuer conduit à une baisse de l'énergie consommée par le système de refroidissement.

III. Méthode de proposition des scénarios de reconception :

La méthode de proposition des scénarios de reconception a pour l'objectif final de retenir les actions à mener pour améliorer l'efficacité énergétique du moyen de production.

Dans cette méthode, l'idée est d'utiliser les informations concernant le gain énergétique potentiel des organes identifiées préalablement. En s'appuyant sur les grandes pistes d'amélioration énergétique présentées, il est possible de proposer des scénarios de reconception.

III.1. Les grandes pistes de reconception :

Les grandes pistes de reconception sur lesquelles nous pouvons nous appuyer afin de proposer les actions à mener pour améliorer l'efficacité énergétique du moyen de production sont les suivantes :

- **Remplacement par une technologie plus efficace** : l'énergie non valorisée du moyen de production peut-être issue de composants ou de sous-systèmes qui ne sont pas efficaces en termes d'énergie. L'idée est de remplacer les composants ou les sous-systèmes énergivores du moyen de production par d'autres qui sont plus efficace.
- **Optimisation de la technologie actuelle** : l'idée est d'optimiser les composants des organes énergivores du moyen de production pour améliorer leur rendement et donc

leur efficacité énergétique. Par exemple, réduire la friction, la masse des parties en mouvement en changeant le matériau, la structure...

- **Utilisation de l'énergie « au juste besoin »** : l'énergie non valorisée du moyen de production peut parfois provenir du mode d'utilisation des organes. Il est donc possible de piloter les organes afin de les utiliser dans des conditions de fonctionnement plus efficaces. L'idée est de mettre en fonctionnement les organes lorsque cela est nécessaire.
- **Récupération de l'énergie** : Afin d'éviter de gaspiller l'énergie, la récupération de l'énergie non valorisée est nécessaire. L'idée est de récupérer l'énergie non valorisée et de la réutiliser ou de la transférer en une autre forme plus utile.

III.2. Méthode de proposition des scénarios de reconception :

III.2.1. Critère de choix de pistes de reconception :

Il est évident que les 4 grandes pistes de reconception ne peuvent pas être appliquées systématiquement sur chaque organe. Nous proposons ici des critères de choix de pistes de reconception. Les critères de choix nous guident à choisir la/les pistes les plus pertinentes pouvant être retenues pour chaque organe.

❖ *Le remplacement ou l'optimisation de la technologie énergivore :*

Le critère pour choisir cette piste de reconception est le rendement de différents organes du moyen de production. Si le rendement d'un organe est faible, nous pouvons le changer ou l'optimiser pour améliorer son rendement et donc son efficacité énergétique.

Le vocabulaire « rendement » reste très ambigu. Dans notre travail, nous nous basons sur la définition : « *Le rendement d'un système est défini comme le rapport entre son efficacité réelle et son efficacité théorique maximale* » [Guillet-Goinard et al., 2007]

Lors d'une transformation d'énergie par un système (Figure IV.8), l'énergie consommée par ce système se transforme en énergie utile et une part d'énergie non utile (la perte). L'énergie utile est celle qui procure le service recherché. L'énergie non utile est celle qui n'est pas désirée mais inévitable. L'efficacité énergétique réelle d'un système est le rapport entre l'énergie utile et l'énergie consommée. Par exemple dans le cas d'un moteur électrique, l'énergie consommée provient de l'électricité. L'énergie utile est l'énergie mécanique délivrée. L'énergie non utile est l'énergie thermique dégagée par le moteur.

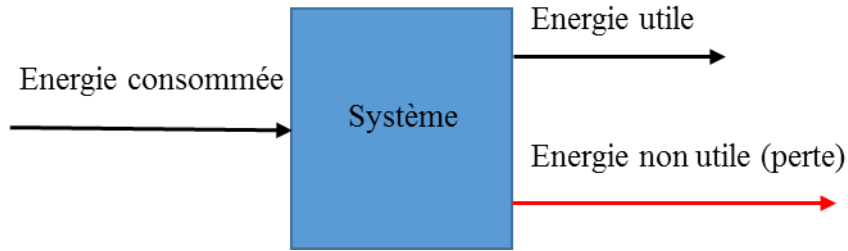


Figure IV.8 : La transformation d'énergie par un système

L'efficacité théorique maximale d'un système est l'efficacité d'un système idéal qui fonctionne sans produire d'énergie non utile. Par exemple, pour une machine thermodynamique l'efficacité énergétique théorique maximale est réalisée par des machines fonctionnant selon un cycle de Carnot. Ce cycle nous donne la valeur de l'efficacité énergétique maximale pouvant être atteinte. Dans le cas d'un moteur électrique, son efficacité théorique maximale est égale à 1. Elle est difficile à atteindre à cause des pertes inévitables. Le rendement d'un moteur électrique est donné donc par le rapport entre la puissance mécanique délivrée et la puissance électrique absorbé.

❖ **Utilisation de l'énergie au juste besoin :**

Le critère pour choisir cette piste est la possibilité de piloter les organes de la machine. Pour ce faire, nous réalisons les études temporelles des organes ayant un gain énergétique potentiellement élevé, en nous basant sur les connaissances du procédé de fabrication et de la machine, afin d'identifier les organes pilotables. L'étude temporelle nous permet d'identifier l'endroit où l'énergie consommée par les organes est non utile. Les organes pilotables sont les organes dont la puissance dépensée non utile est élevée.

En nous basant sur les connaissances du procédé de coupe et celles de la machine-outil, l'étude temporelle du système de lubrification est présentée dans la Figure IV.9. Nous pouvons constater que, pour un procédé de fabrication donné, dans le cycle de travail de la machine, il existe des périodes où la machine ne produit pas de copeau. Par contre, en regardant l'utilisation réelle de la machine, nous nous apercevons que le système de lubrification est toujours mis en route tout au long du cycle de travail de la machine. En regardant l'étude temporelle, l'énergie dépensée du système de lubrification dans les périodes t_1 , t_3 , t_5 , t_7 est non utile. Il est donc possible de travailler sur le pilotage de cet organe pour améliorer son efficacité énergétique. Par exemple, il est possible de mettre en route le convoyeur si la quantité du copeau à évacuer est atteinte et de l'arrêter sinon.

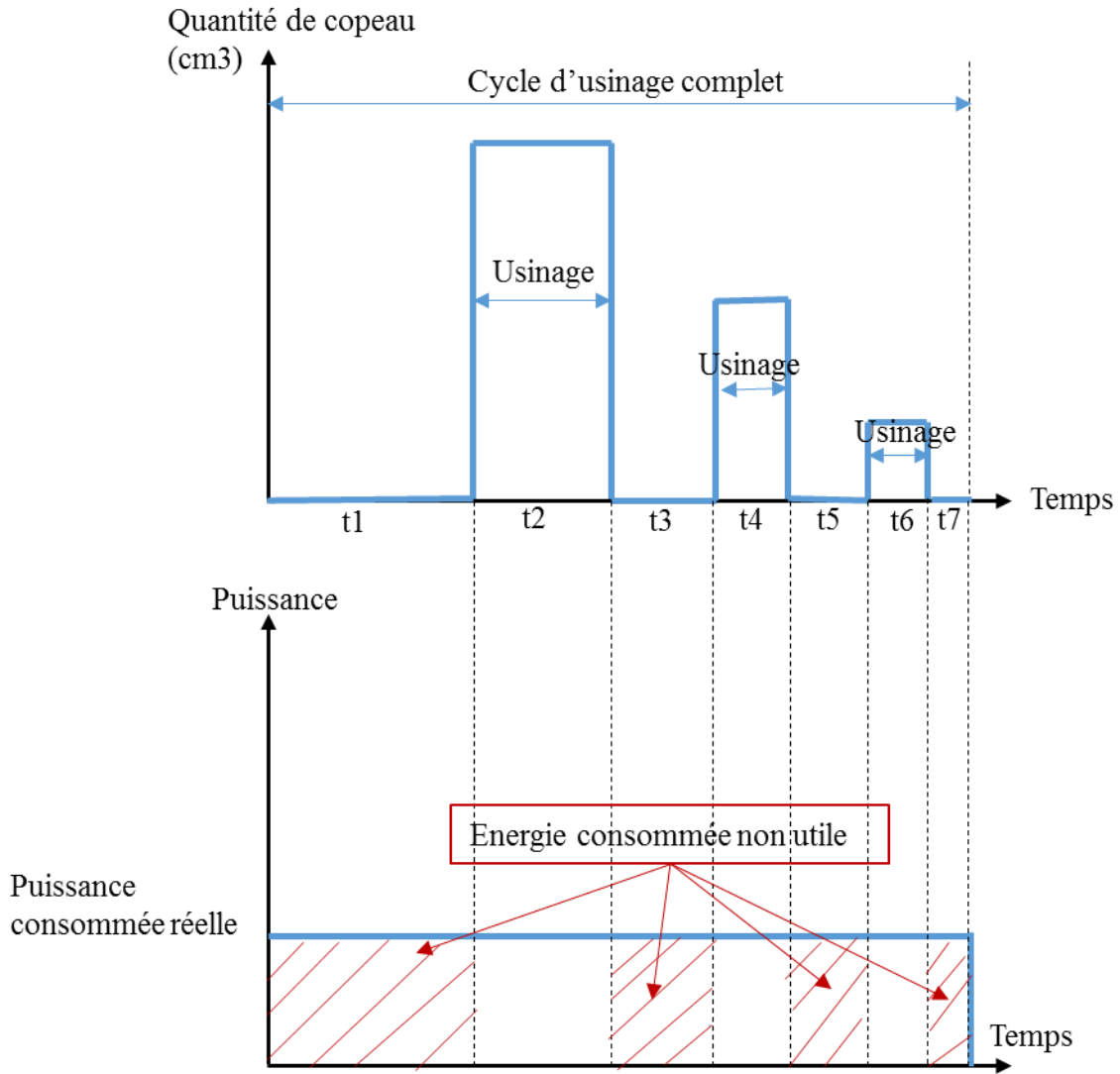


Figure IV.9 : Etude temporelle du système de lubrification

Dans le cas d'un système hydraulique utilisé dans le changement d'outil de coupe, le système est nécessaire lors du changement d'outil. En nous basant sur le procédé de coupe, nous pouvons connaître le nombre de changements d'outils à réaliser. Dans l'utilisation réelle de la machine, le système hydraulique est mis en route tout le temps même si aucun changement d'outil n'est demandé. L'énergie consommée du système hydraulique entre deux changements d'outil est inutile. L'étude temporelle du système hydraulique (Figure IV.10) montre qu'il est possible de démarrer le système s'il y a un changement d'outil et de l'arrêter entre deux changements d'outil.

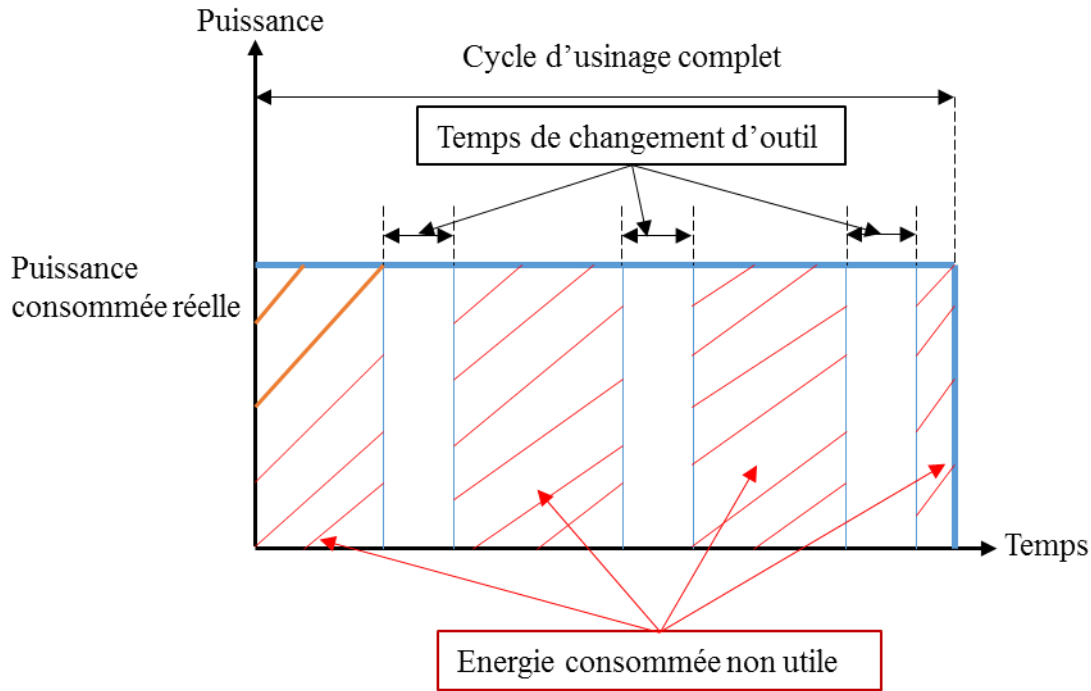


Figure IV.10 : Etude temporelle du système hydraulique

En appliquant la piste de reconception « Utilisation au juste besoin », il est nécessaire de prendre en compte certaines contraintes ci-dessous :

- *La faisabilité en terme technologique* : le pilotage est utilisable quand la technologie permet d'arrêter/mettre en veille l'organe pendant le temps où il n'apporte pas de valeur ajoutée et de le redémarrer si nécessaire.
- *La compensation de l'énergie pour redémarrer l'organe* : il est important de bien penser à la part d'énergie demandée pour redémarrer l'organe une fois qu'il est arrêté/mis en veille. En effet, si l'énergie nécessaire pour redémarrer l'organe reste importante et le temps de redémarrage est long, l'intérêt de la piste de pilotage reste faible.
- *Le transfert d'impact entre les organes* : c'est-à-dire vérifier que le pilotage appliqué sur un organe ne crée pas d'impact négatif sur les autres organes.

❖ **Récupération de l'énergie :**

Cette piste présente un intérêt lorsque la valeur de l'énergie non valorisée d'un organe est élevée et qu'il est possible de la stocker, de la transformer ou de la réutiliser. Par exemple, il est intéressant de récupérer l'énergie lors du freinage, la stocker et l'utiliser pour redémarrer la voiture comme le fait le système « STOP and GO »

III.2.2. Démarche de proposition des actions de reconception :

La démarche de proposition des actions de reconception pour réduire la consommation énergétique d'un moyen de production est illustrée dans la Figure IV.11:

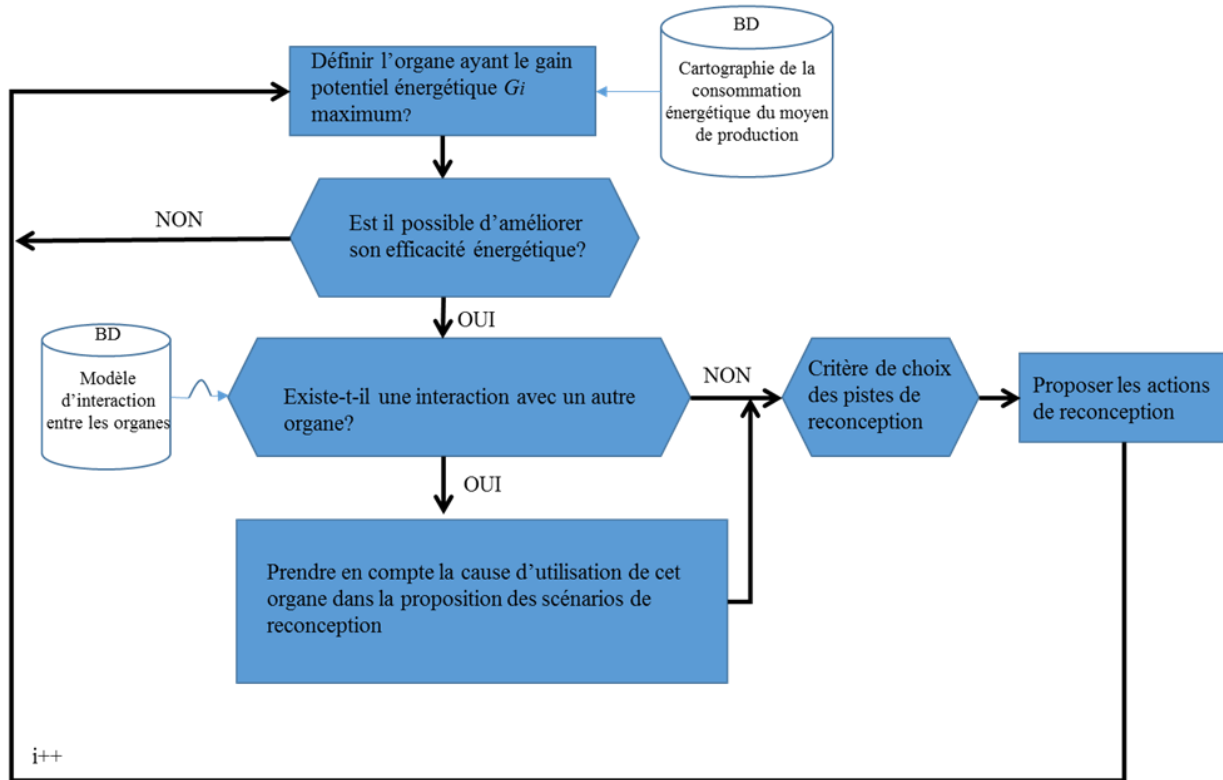


Figure IV.11 : Démarche de proposition des actions de reconception

La cartographie de la consommation énergétique du moyen de production présentée dans le chapitre précédent nous permet d'identifier les parties de la matrice de l'interaction énergétique sur lesquelles nous pouvons travailler pour améliorer l'efficacité énergétique. Dans nos travaux, nous commençons à travailler pour améliorer l'efficacité énergétique des organes ayant le gain énergétique potentiel le plus grand.

Les parties de la matrice de l'interaction énergétique sur lesquelles nous travaillons peuvent concerner un organe ou plusieurs organes inter-liées énergétiquement.

Comme indiqué précédemment dans la partie II, l'amélioration de l'efficacité énergétique d'un moyen de production n'est pas la somme des résultats de l'amélioration de l'efficacité énergétique individuelle de ses différents organes. Il est nécessaire de prendre en compte les interactions énergétiques entre elles. Lorsqu'il existe une interaction énergétique entre les organes, les actions de reconception sont proposées en regardant les consignes suivantes :

- Il faut prendre en compte l'utilisation de cet organe

- Il faut faire attention que les actions proposées ne créent pas d'impacts négatifs sur les autres organes inter-liés énergétiquement.

IV. Exemple :

Dans cette partie, un cas d'étude est réalisé afin d'illustrer l'utilisation de la méthode de proposition des scénarios de reconception.

IV.1. Analyse fonctionnelle :

Les fonctions de la machine sont les suivantes :

- ❖ Réaliser les mouvements de l'outil de coupe
- ❖ Réaliser les mouvements de la table
- ❖ Pressurer la broche
- ❖ Refroidir le process de fabrication
- ❖ Refroidir de la machine-outil
- ❖ Distribuer l'alimentation générale de la machine
- ❖ Traiter les déchets/copeaux

En se basant sur la cartographie de consommation énergétique obtenue, nous obtenons la liste des technologies, voir Figure IV.12 ci-dessous :

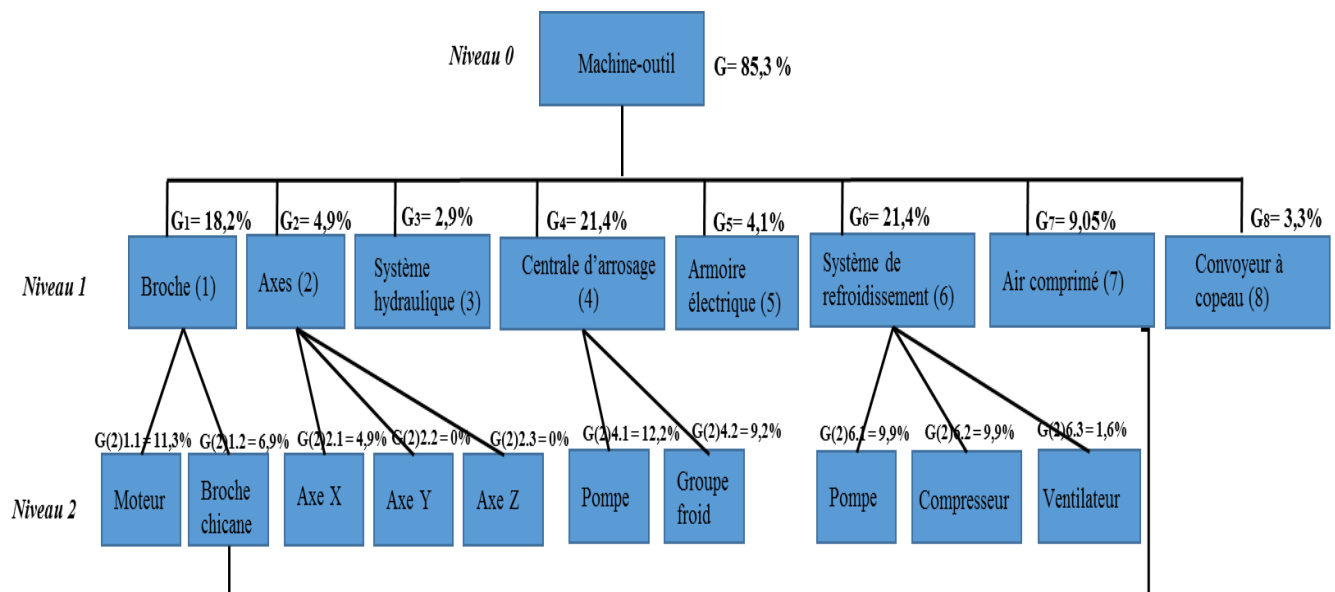


Figure IV.12 : La cartographie de la consommation énergétique de la machine

La matrice relation Fonction-Technologie de la machine est donc représentée dans la Figure IV.13 ci-dessous :

<div>Technologie</div> <div>Fonction</div>	Moteur broche	Broche chicane	Moteur d'axe	Système de réfrigération		Air comprimé général	Armoire électrique	Centrale d'arrosage		Convoyeur à copeau
				Pompe	Compresseur			Pompe alimentation de la machine	Groupe froid	
Réaliser des mouvements de l'outil de coupe	X									
Réaliser des mouvements de la table			X							
Refroidir le process de fabrication								X	X	
Refroidir la machine				X	X					
Manipuler l'outil de coupe						X				
Pressuriser la broche		X								
Distribuer l'alimentation générale de la machine							X			
Traiter les déchets/copeaux										X

Figure IV.13 : Matrice relation Fonction-Technologie

IV.2. Matrice d'interaction énergétique entre les organes :

Dans la matrice d'interaction énergétique entre les organes, la diagonale de la matrice représente la consommation énergétique réelle des technologies. Elles sont mesurées sur la machine-outil, les résultats sont présentés dans le tableau suivant :

Technologie	Moteur broche	Broche chicane	Moteur d'axe X	Centrale d'arrosage		Armoire électrique	Système de refroidissement		Air comprimé général	Convoyeur à copeau
				Pompe	Groupe froid		Pompe	Compresseur		
Energie consommée (Wh)	190	115	60	200	150	50	120	120	225	40

Tableau IV.1 : L'énergie réelle consommée par différents organes

Pour remplir la matrice de l'interaction énergétique, nous déterminons les interactions énergétiques entre les organes en se basant sur la fonction de chaque organe. Les interactions énergétiques sont :

- *Le système de refroidissement avec le moteur broche, moteur d'axe X, l'armoire électrique* : En effet, plus le rendement du moteur broche, moteur d'axe et l'armoire électrique est faible, plus la chaleur dégagée est élevée. Pour évacuer autant de chaleur, le système de refroidissement consomme une grande quantité d'énergie. Cela crée de l'interaction énergétique entre eux.

La chaleur issue du moteur broche et du moteur d'axe X est calculée en se basant sur son rendement η :

$$E_{\text{chaleur dégagée}} = E_{\text{réelle consommée}} \times (1 - \eta)$$

A partir des documentations de la machine-outil, nous pouvons calculer le rendement des moteur broche et moteur d'axe. Par exemple, pour le moteur broche, le rendement du moteur est calculé :

$$\eta = \frac{P_{\text{mécanique}}}{P_{\text{électrique}}} = \frac{C * V}{P_{\text{électrique}}}$$

Avec :

$P_{\text{mécanique}}$: la puissance mécanique délivrée

C : le couple (N.m)

V : la vitesse (rad/s)

$P_{\text{électrique}}$: la puissance électrique (W)

Pour la machine-outil utilisée dans notre cas d'étude, le rendement des moteurs de broche et d'axes est égale à 92%

L'énergie dégagée sous forme de chaleur par le moteur broche est donc :

$$E_{\text{chaleur dégagée broche}} = E_{\text{réelle consommée}} \times (1 - \eta) = 190 \times (1 - 0.92) = 15 \text{ Wh}$$

L'énergie dégagée sous forme de chaleur par le moteur d'axes est donc :

$$E_{\text{chaleur dégagée axe}} = E_{\text{réelle consommée}} \times (1 - \eta) = 60 \times (1 - 0.92) = 4.8 \text{ Wh}$$

L'énergie dégagée sous forme de chaleur par l'armoire électrique est donc égale à 50 Wh.

- *L'air comprimé général et la broche chicane :*

Plus la valeur du flux d'air consommé par les chicanes de la broche chicane est élevée, plus l'énergie consommée par l'air comprimé est élevée.

L'énergie consommée par l'air comprimé (225Wh) dépend non seulement de la technologie de l'air comprimé utilisée actuellement par la machine mais également de la valeur du flux d'air demandée par les chicanes de la broche (115 Wh).

La matrice d'interaction énergétique de la machine-outil est illustrée ci-dessous (Figure IV.14) :

Organe \ Organe	Moteur broche	Broche chicane	Moteur d'axe	Pompe_réf	Compresseur	Air comprimé général	Armoire électrique	Pompe alimentation de la machine	Groupe froid	Convoyeur à copeau
Moteur broche	190Wh									
Broche chicane		115 Wh								
Moteur d'axe			60Wh							
Pompe_réf	15Wh ↑		4.8Wh ↑	120Wh			50Wh ↑			
Compresseur	15Wh ↑		4.8Wh ↑		120Wh		50Wh ↑			
Air comprimé général		115 Wh ↑				225Wh				
Armoire électrique							50Wh			
Pompe alimentation de la machine								200Wh		
Groupe froid									150Wh	
Convoyeur à copeau										40Wh

Figure IV.14 : Matrice d'interaction énergétique

IV.3. Proposition des scénarios des scénarios de reconception :

En nous basant sur la cartographie de la consommation énergétique de la machine-outil (Figure IV.12) et en utilisant notre démarche de proposition des scénarios de reconception (partie III.2.2), nous pouvons proposer les actions de reconception sur les organes ayant le gain énergétique potentiel élevé de la machine-outil. Pour que les actions de reconception proposées soient pertinentes, il faut avoir des bonnes connaissances sur les technologies utilisées par la machine. Ce qui est difficile à obtenir dans notre cas. Nous débutons donc à travailler sur les organes ayant le gain potentiel élevé: la centrale d'arrosage, l'air comprimé et le système de refroidissement de la machine (pompe et compresseur) pour illustrer la démarche de proposition des scénarios proposée.

Centrale d'arrosage :

En regardant sur la matrice d'interaction énergétique de la machine, nous constatons qu'il n'existe pas d'interaction énergétique entre la centrale d'arrosage et les autres organes de la machine. Nous pouvons proposer les actions de reconception pour cet organe en nous basant sur les 4 grandes pistes d'amélioration d'efficacité énergétique.

- La documentation de la machine nous indique que la centrale d'arrosage utilisée est efficace en termes d'énergie consommée
- L'étude temporelle de la centrale d'arrosage. En nous basant sur les connaissances du procédé d'usinage (le temps de coupe, le temps du cycle de travail de la machine) et sur les connaissances de la machine-outil (la consommation énergétique réelle de la pompe d'arrosage), nous obtenons ci-dessous le résultat d'étude temporelle (Figure IV.15)

A partir de l'étude temporelle réalisée de la centrale d'arrosage, nous pouvons constater que seulement 27% d'énergie est consommée par la centrale d'arrosage quand la machine produit de copeau. La part d'énergie consommée quand la machine ne produit pas de copeau (l'énergie consommée non utile) reste importante (73% de la consommation d'énergie totale de la pompe d'arrosage). Ce résultat nous montre l'intérêt de piloter la centrale d'arrosage pour réduire la part d'énergie consommée non utile quand la machine ne produit pas de copeau. Pour ce faire, nous mettons en route la centrale d'arrosage seulement quand la machine produit du copeau.

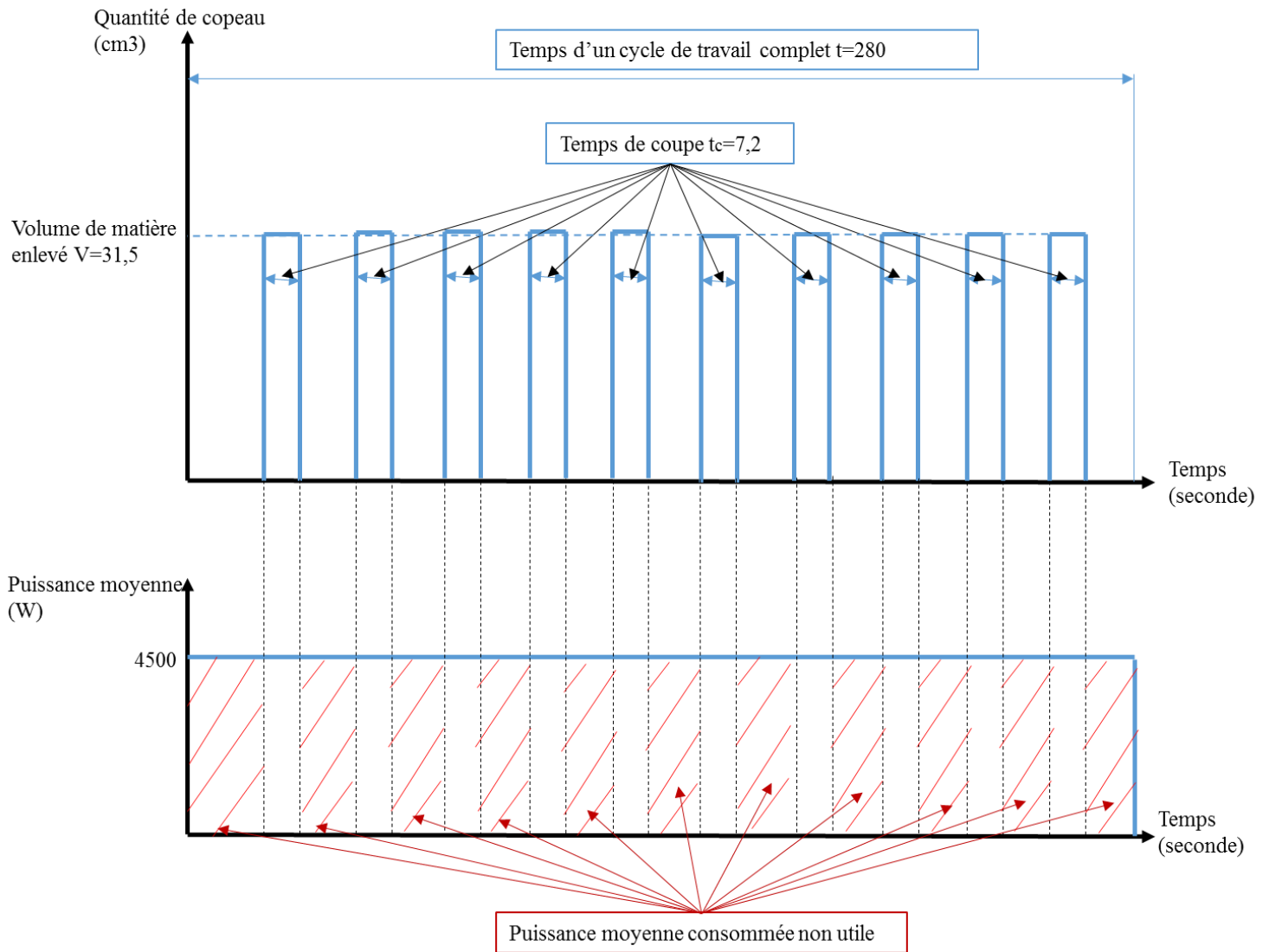


Figure IV.15 : Etude temporelle de la centrale d'arrosage

✚ Air comprimé :

Selon la matrice d'interaction énergétique entre les organes, il existe une interaction énergétique entre l'air comprimé et la broche (chicane). Plus l'énergie consommée par la broche (chicane) est élevée, plus le compresseur d'air comprimé consomme de l'énergie. En prenant en compte cette interaction énergétique, ce que l'on peut proposer pour réduire la consommation énergétique de l'air comprimé est de réduire/éviter la consommation énergétique de la broche chicane en remplaçant la technologie de la broche par celle ayant une pressurisation de la broche minimisant les fuites.

✚ Système de refroidissement :

La matrice de l'interaction énergétique nous montre qu'il y a une interaction énergétique entre le système de refroidissement et les moteurs de broche et des axes et l'armoire électrique. La consommation énergétique du système de refroidissement dépend de

la quantité de la chaleur dégagée par les moteurs électriques et l'armoire électrique. Pour réduire l'énergie consommée par le système de refroidissement, nous pouvons travailler soit sur la quantité de la chaleur à évacuer soit sur le système de refroidissement lui-même pour améliorer son rendement.

V. Conclusion :

Dans ce chapitre, une méthode de proposition des scénarios de reconception permettant de retenir les actions à mener afin de réduire la consommation énergétique a été présentée. Un cas d'étude a été utilisé pour illustrer l'utilisation de la méthode proposée.

Conclusions et perspectives

I. Conclusion

Dans cadre de cette thèse, le cœur de notre travail repose sur la méthodologie de reconception du moyen de production sans évolution du procédé de fabrication en améliorant l'efficacité énergétique. Cette méthodologie s'articule autour de deux grandes étapes : une étape d'analyse permettant d'obtenir une cartographie de consommation avec le gain énergétique potentiel des différents organes du moyen de production et une étape permettant de proposer des scénarios de reconception alternatives.

Le premier point abordé dans ce manuscrit est le contexte général de l'étude qui montre la nécessité de prise en conscience de l'efficacité énergétique dans l'industrie et en particulier dans le secteur de la production face aux enjeux énergétique et enjeux législatifs posés actuellement.

Un état de l'art portant sur la consommation énergétique, avec différents niveaux d'analyse et les actions et approches d'amélioration de l'efficacité énergétique du moyen de production existantes dans la littérature a été présenté dans le deuxième chapitre. Cet état de l'art nous permet de positionner notre travail de thèse et de mettre en évidence la nécessité de proposer une méthodologie de reconception des moyens de production.

La reconception pour l'efficacité énergétique s'articule autour de deux phases : une phase d'analyse et une phase de proposition des reconceptions alternatives visant à tendre vers une cible idéale. Une méthode d'analyse du moyen de production a été présentée dans le troisième chapitre. L'intérêt de la méthode d'analyse proposé est d'obtenir une cartographie des consommations suffisamment précise avec un nombre d'informations strictement nécessaire. Les informations sortantes de la phase d'analyse concernant les gains énergétiques potentiels des organes du moyen de production nous permettent ensuite de proposer les scénarios de reconception. La méthode de proposition des scénarios de reconception a été proposée dans le quatrième chapitre. Elle nous guide pour proposer des scénarios de reconception afin d'améliorer l'efficacité énergétique du moyen de production en nous basant sur les grande pistes de reconception : *remplacement par une technologie plus efficace, optimisation de la technologie actuelle, utilisation de l'énergie « au juste besoin » et récupération de l'énergie*. Le point fort de cette méthode est de prendre en compte les

interactions énergétiques et le transfert d'impact entre différents organes d'un moyen de production dans la proposition des scénarios de reconception.

II. Perspectives

Dans cadre de notre travail de thèse, nous nous sommes restreints au contexte d'amélioration de l'efficacité énergétique d'un moyen de production tout en gardant le procédé de fabrication inchangé. Il serait donc possible et intéressant d'améliorer l'efficacité énergétique du moyen de production en prenant en compte l'évolution du procédé de fabrication.

Dans notre travail également, les actions de reconception proposées ne restent que des perspectives d'évolution d'un moyen de production. Il est nécessaire de réaliser donc une étape d'évaluation afin de retenir les scénarios de reconception le plus pertinentes possibles pour la mise à jour du moyen de production.

Bibliographie

- [ADEME, 2013] ADEME, (2013). Contribution de l'ADEME à l'élaboration de visions énergétiques 2030-2050. Disponible sur: <http://www.ademe.fr/contribution-lademe-a-lelaboration-visions-energetiques-2030-2050> (Accédé en Janvier 2016)
- [Ahmad et al., 2005] Ahmad, N., Tanaka, T., Saito, Y., (2005). "Optimization of cutting parameters for end milling operation by soap based genetic algorithm". *Power* 318 (2): 5.
- [Apostolos et al., 2013] Apostolos, F., Alexios, P. Georgios, P., Panagiotis, S. et George, C. (2013). « Energy Efficiency of Manufacturing Processes: A Critical Review ». *Procedia CIRP* 7
- [Ashby et al., 2008] Ashby, M. F., Miller, A., Rutter, F., Seymour, C. and Wegst, U. G. K. (2008). *The CES Eco Selector –Background Reading*, Granta Design Ltd., Cambridge.
- [Avram et al., 2011] Avram, O. I., Xirouchakis, P., (2011). "Evaluating the use phase energy requirements of a machine tool system". *Journal of Cleaner Production* 19 (6-7): 699-711.
- [Babu et al., 2012] Babu, D. M., Kumar, M. S., Vishnuu, J., (2012). "Optimization of cutting parameters for CNC turned parts using Taguchi's technique". *Annals of faculty engineering Hunedoara, International journal engineering*.
- [Bonvoisin et al., 2012] Bonvoisin, J., Thiede, S., (2012). "Vers une estimation de l'énergie de fabrication d'un produit dès sa conception". 13e Colloque National AIP PRIMECA.
- [Boothroyd et al., 1983] Boothroyd, G., Dewhurst, P. (1983). *"Design for Assembly : a designer's handbook"*. University of Massachusetts. 17
- [Brecher et al., 2013] Brecher, C., Triebs, J., Jasper, D., (2013). "Energy efficient solutions for hydraulic units of machine tool". *Proceedings of the 20th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering*, Singapore. Pp 191-196
- [Chen et al., 1989] Chen, S. J., Hinduja, S. et Barrow, G., (1989). "Automatic tool selection for rough turning operations". *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 29 (4): 535-53.
- [Dahmus et al., 2004] Dahmus, J. B., et Gutowski, T. G., (2004). "An environmental analysis of machining". *ASME 2004 International mechanical engineering congress and exposition*, 643-52. American Society of Mechanical Engineers.
- [Delafollie, 1991] Delafollie, G., (1991), *Analyse de la Valeur*, Hachette Technique.
- [Devoldere et al., 2007] Devoldere, T., Dewulf, W., Deprez, W. Willems, B. et Duflou, J. R., (2007). "Improvement potential for energy consumption in discrete part production machines". *Advances in Life Cycle Engineering for Sustainable Manufacturing Businesses*, 311-16. Springer.
- [Diaz et al., 2009] Diaz, N., Helu, M., Jarvis, A., Tönissen, S., Dornfeld, D. et Schlosser, R., (2009). "Strategies for minimum energy operation for precision machining". *Laboratory for Manufacturing and Sustainability*.
- [Diaz et al., 2010] Diaz, N., Choi, S., Helu, M., Chen, Y., Jayanathan, S., Yasui, Y., Kong, D., Pavanaskar, S., et Dornfeld, D., (2010). « Machine tool design and operation strategies for green manufacturing ». *Laboratory for Manufacturing and Sustainability*.

- [Diaz et al., 2011] Diaz, N., Redelsheimer, E., Dornfeld, D., (2-4 mai 2011). "Energy Consumption Characterization and Reduction Strategies for Milling Machine Tool Use". 18th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering, 263-267, Brunswick, Allemagne.
- [Dietmair et al., 2009] Dietmair, A., Verl, A., (2009). "A generic energy consumption model for decision making and energy efficiency optimisation in manufacturing". *International Journal of Sustainable Engineering*, 2/2, 123–133
- [DIN 9000 , 2009] DIN 9000 (2009): Qualitätsmanagement. Berlin: Beuth
- [Drechsel et al., 2013] Drechsel, M., Bornschlegl, M., Spreng, S., Bregullay, M., Audi Planung, GmbH.,(2013). "A New Approach to Integrate Value Stream Analysis into a Continuous Energy Efficiency Improvement Process". Industrial Electronics Society, IECON 2013 - 39th Annual Conference of the IEEE
- [Duflou et al. 2012] Duflou, J. R., Sutherland, J. W. Dornfeld, D., Herrmann, C., Jeswiet, J., Kara, S., Hauschild, M. et Kellens, K., (2012). "Towards energy and resource efficient manufacturing: A processes and systems approach". *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 61 (2): 587-609
- [EN 1325-1, 1996] : Norme EN 1325-1 (1996). Vocabulaire du management de valeur, de l'analyse de la valeur et de l'analyse fonctionnelle - Partie 1 : analyse de la valeur et analyse fonctionnelle
- [EuP Directive 2005/32/EC, 2009] European Commission (2009) Directive 2005/32/EC of the European Parliament and of the council with regard to ecodesign requirements for electric motors. Commission Regulation (EC) No 640/2009
- [European Commission, 2009] European Commission (2009). The important of energy, Available
at:http://ec.europa.eu/research/energy/print.cfm?file=/comm/research/energy/gp/gp_imp/article_1081_en.htm [Accessed Jan 2016]
- [European Commission, 2009], European Commission (2009). "ICT and energy efficiency - the case for manufacturing", Recommendations of the Consultation Group, European Commission, no. ISBN: 978-92-79-11306-2, February 2009.
- [Everhart, 1960] Everhart, J.L., (1960). Handbook of parts, forms, processes and materials in design engineering, Van-Nostrand-Reinhold, New York
- [Gontarz et al., 2012] Gontarz, A., Weiss, L., et Wegener, K., (2012). "Evaluation approach with function-oriented modeling of machine tools". Institute of Machine Tools and Manufacturing (IWF), ETH Zurich, Switzerland.
- [Guillet-Goinard et al., 2007] Guillet-Goinard, F., Maimi, L., *Toute la fonction Production: Savoirs, Savoir-faire, Savoir-être*, 2007
- [Gutowski et al., 2005] Gutowski, T., Murphy, C., Allen, D., Bauer, D., Bras, B., Piwonka, T., Sheng, P., Sutherland, J., Thurston, D. et Wolff, E., (2005). "Environmentally Benign Manufacturing: Observations from Japan, Europe and the United States". *Journal of Cleaner Production* 13 (1): 1-17.
- [Gutowski et al., 2006] Gutowski, T., Dahmus, J. et Thiriez, A., (2006). "Electrical energy requirements for manufacturing processes". In 13th CIRP international conference on life cycle engineering. Vol. 31.

- [Gutowski et al., 2007] Gutowski, T., Dahmus, J.B., Thiriez, A. , Branham, M.S., Jones, A. (2007) "A thermodynamic characterization of manufacturing processes". Computer Society; international association of electronics recyclers; IEEE international symposium on electronics & the environment; ISEE; international association of electronics recyclers (IAER) summit; Electronics recycling summit, Proceedings of the 2007 IEEE international symposium on electronics & the environment. 7–10 May 2007, Orlando, FL, USA
- [He et al., 2011] He, Y., Liu, B. Zhang, X. Gao, H. et Liu, X., (2011). "A modeling method of task-oriented energy consumption for machining manufacturing system". Journal of Cleaner Production.
- [Hinduja et al., 2004] Hinduja, S., Sandiford, D. , (2004). "An optimum two-tool solution for milling 2½D features from technological and geometric viewpoints". CIRP Annals-manufacturing Technology 53(1):77–80
- [Huang, 1996] Huang, Q., (1996). Design for X: concurrent engineering imperatives, Chapman & Hall Edition
- [IAE, 2008] IEA (2008) World Energy Outlook 2008, OECD/International Energy Agency, Paris
- [IAE, 2009] IEA (2009) World Energy Outlook 2009, OECD/International Energy Agency, Paris.
- [IAE, 2014] IEA (2014). Key word energy statistics 2014. Disponible sur: http://www.cdclimat.com/IMG/pdf/14-10_reperes_2015_eng_part_2.pdf (Accédé en Janvier 2016)
- [International Standard Organization, 2011] International Standard Organization (2011) Energy management systems—Requirements with guidance for use (ISO 50001:2011)
- [ISO/DIS 14955-1, 2014] ISO/DIS 14955-1, (2014). Machine Tools e Environmental Evaluation of Machine Tools. Part 1: Design methodology for Energy-efficient Machine Tools. Standard under Development, Geneva, Switzerland
- [ISO 9000: 2005] ISO 9000: 2005 Energy management systems — Fundamentals and vocabulary
- [Kara et al., 2011] Kara, S., Li, W., (2011). "Unit Process Energy Consumption Models for Material Removal Processes". CIRP Annals - Manufacturing Technology 60 (1): 37-40.
- [Kellens et al., 2011] Kellens, K., Dewulf, W., Overcash, M., Hauschild, M. Z., Duflou, J. R., (2011). "Methodology for systematic analysis and improvement of manufacturing unit process life-cycle inventory (UPLCI)—CO2PE! Initiative (Cooperative effort on process emissions in manufacturing)". Part 1: Methodology description
- [Kroll et al., 2011] Kroll, L., Blau, P., Wabner, M., Frieß, U., Eulitz, J., Klarne, M., (2011). "Lightweight components for energy-efficient machine tools". CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology 4, 148–160
- [Kuo, 2001] Kuo, T., (2001). "Design for manufacture and design for 'X' : concepts, applications, and perspectives". Computers & Industrial Engineering, 41(3) :241–260. 17
- [Kuo et al., 2001] Kuo, T-C., Huang, S.H., Zhang, H-C., (2001). "Design for manufacture and design for X: concepts, applications, and perspectives". Computers & Industrial Engineering, 41(3), pp. 241 260

- [Larek et al., 2011] Larek R., Brinksmeier, E., Meye, D., Pawletta, T., Hagendorf, O., (2011). "A discrete-event simulation approach to predict power consumption in machining processes". *Production Engineering Research and Development* .Volume 5, 575-579.
- [Lee et al., 2000] Lee, B. Y., Tarn, Y. S., (2000). "Cutting-parameter selection for maximizing production rate or minimizing production cost in multistage turning operations". *Journal of Materials Processing Technology* 105 (1): 61-66.
- [Li et al., 2010] Li, W., Kara, S., (2010). "An Empirical Model for Predicting Energy Consumption of Manufacturing Processes: A Case of Turning Process". *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B, Journal of Engineering Manufacture*.
- [Mativenga et al., 2011] Mativenga, P.T., Rajemi, M.F., (2011). "Calculation of Optimum Cutting Parameters Based on Minimum Energy Footprint". *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 60 (1): 149-152.
- [MEDDE/SOeS, 2013] Le bilan énergétique de la France 2012, Juillet 2013. Disponible sur: <http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/publications/p/2013/969/bilan-energetique-france-2012.html> (Accédé en Janvier 2016)
- [Mori et al., 2011] Mori, M., Fujishima, M., Inamasu, Y. et Oda, Y., (2011). "A study on energy efficiency improvement for machine tools". *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 60 (1): 145-148.
- [Museau et al., 2012] Museau, M., Paris, H., (2012). "Différentes pistes pour améliorer l'efficacité énergétique en production de pièces mécaniques". *Machine et Usinage à Grande Vitesse - MUGV 2012*, St Etienne, France.
- [Neugebauer et al., 2010] Neugebauer, R., Frieß, U., Paetzold, J., Wabner, M., Richter, M., (2010). "Approach for the development of energy efficiency machine tools". *Conference on Supervising and Diagnostics of Machining Systems*.
- [NF X 50-151, 1991] Norme NF X 50-151, (1991). *Analyse de la Valeur, Analyse Fonctionnelle - Expression fonctionnelle du besoin et cahier des charges fonctionnel*.
- [O'Driscoll, 2002] O'Driscoll, M. (2002). "Design for manufacture". *Journal of Materials Processing Technology*, 122(2-3) :318–321. 17
- [Paris et al., 2012] Paris H. et Museau M., 2012. "Contribution to the environmental performance of the dry vibratory drilling technology". *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Volume 61, Issue 1, 2012, Pages 47-50
- [Patterson, 1996] Patterson MG (1996) What is energy efficiency? *Energy Policy* 24:377–390
- [Pech, 1973] Pech, H., (1973). *Designing for Manufacture*, Topics in Engineering Design series, Pitman & Sons Ltd, London, UK
- [Planck et al., 1964] Planck, M., Päsler, M., (1964). *Vorlesungen über Thermodynamik* 11. Ed., Berlin: de Gruyter
- [PSA, 1999] CA 17314, « Guide ISA, démarche d'ingénierie système automobile », usage interne PSA, 20décembre 1999
- [Ranky, 1994] Ranky, P. G., (1994). *Current/Simultaneous Engineering : Methods. Tools & Case Studies*, CIMware Limited, Guildford, Surrey, UK. ix, 16
- [Santos et al., 2011] Santos, J. P., Oliveira, M., Almeida, F. G., Pereira, J. P. et Reis, A., (2011). "Improving the Environmental Performance of Machine-Tools: Influence of

- Technology and Throughput on the Electrical Energy Consumption of a Press-Brake". *Journal of Cleaner Production* 19 (4): 356-364.
- [Schiefer, 2000] Schiefer, E. (2000) *Ökologische Bilanzierung von Bauteilen für die Entwicklung umweltgerechter Produkte am Beispiel spanender Fertigungsverfahren*. Dissertation. Shaker, Aachen, Darmstadt
- [Schlosser et al., 2011] Schlosser, R., Klocke, F., Döbbeler, B. , Riemer, B. , Hameyer, K. , Herold, T., Zimmermann, W., Nuding, O., Schindler, B. A., Niemczyk, M., (2011). "Assessment of Energy and Resource Consumption of Processes and Process Chains within the Automotive Sector". *Globalized Solutions for Sustainability in Manufacturing*, 45-50
- [Thiede et al., 2012] Thiede, S., Bogdanski, G. et Herrmann, C., (2012). «A Systematic Method for Increasing the Energy and Resource Efficiency in Manufacturing Companies". *Procedia CIRP* 2 (janvier): 28-33.
- [Toussaint, 2010] Toussaint, L., (2010). "Modèle et méthode pour une conception hautement productive orientée vers la fabrication : application à l'ingénierie routinière des pièces plastiques", *École doctorale Sciences Pour l'Ingénieur et Microtechniques – SPIM*, Thèse de doctorat.
- [Vayre et al., 2012] Vayre, B., Vignat, F., Villeneuve, F. "Metallic additive manufacturing: state-of-the art review and prospects". *Mechanics & Industry*, Accepted: 17/01/2012.
- [Weber, 2007] Weber, C., (2007). "Locking at "DFX" and "Product Maturity" from the Prospective of a new Approach to Modeling Product and Product Development Processes". *The Future of Product Development*. Vol. 3, pp. 85-104.
- [Wolfram, 1986] Wolfram, F. (1986) *Aspekte der energetischen Bewertung von Produkten und Prozessen der Abtrenntechnik nach dem Prinzip der vergegenständlichten Energie*. Dissertation
- [Yoon et al., 2013] Yoon, H. S., Moon, J. S., Pham, M. Q., Lee, G. B. et Ahn, S. H., (2013). "Control of Machining Parameters for Energy and Cost Savings in Micro-Scale Drilling of PCBs". *Journal of Cleaner Production* 54 (septembre): 41-48.
- [Zein et al., 2011] Zein, A., Li W., Herrmann, C., Kara, S., (2011). "Energy Efficiency Measures for the Design and Operation of Machine Tools: An Axiomatic Approach". *Globalized Solutions for Sustainability in Manufacturing*, 274-279.
- [Zein, 2012] Zein, A., (2012). *Transition towards energy efficient machine tool. Sustainable production, life cycle engineering and management*.
- [Zhou et al., 2016] Zhou, L., Li, J., Li, F., Meng, Q., Li, J., Xu, X. "Energy consumption model and energy efficiency of machine tools: a comprehensive literature review". *Journal of Cleaner Production* 112 (2016) 3721-3734

Reconception de l'outil de production dans un contexte de minimisation de la consommation énergétique

Résumé

Face aux problématiques liées à la consommation énergétique des sites industriels, la prise de conscience de la consommation énergétique prend son importance. La conception pour l'efficacité énergétique visant à améliorer l'efficacité énergétique du moyen de production est actuellement devenue une des approches qui suscite le plus d'intérêt auprès des chercheurs.

Cette thèse propose une méthodologie de reconception pour l'efficacité énergétique en gardant le procédé de fabrication inchangé. Cette méthodologie s'articule autour de 2 grandes étapes : l'analyse du moyen de production et de ses organes en se basant sur un indicateur d'efficacité énergétique afin d'obtenir une cartographie de consommation énergétique suffisamment précise, la proposition des scénarios de reconception visant à modifier la conception actuelle en se basant sur les grandes pistes d'amélioration d'efficacité énergétique. En termes d'illustrations, un cas d'étude réalisé au sein d'un centre d'usinage est utilisé pour illustrer la méthodologie proposée.

Mots clés : consommation énergétique, efficacité énergétique, moyen de production, pistes d'amélioration d'efficacité énergétique, scénario de reconception

Production system redesign in the context of minimization of energy consumption

Abstract

Facing the problems related to energy consumption in industrial sites, the awareness of energy consumption takes its importance. Design for energy efficiency aimed at improving the energy efficiency production system has now become one of the approaches that arouses the most interest among researchers.

This thesis proposes a redesign methodology for energy efficiency while keeping the manufacturing process unchanged. This methodology is based on two main steps: the analysis of production system and its components based on an energy efficiency indicator to obtain a sufficiently precise energy consumption cartography, the proposal of redesign scenario aimed at changing the current design based on different guidelines. In terms of illustrations, a case study conducted in a machining center is used to illustrate the methodology proposed.

Keys words: energy consumption, energy efficiency, production system, energy efficiency guideline, redesign scenario